

Universidade de Lisboa

Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



**Avaliação e Cartografia da Suscetibilidade à Ocorrência de  
Deslizamentos na Ilha da Madeira**

**Paulo Alexandre Galvão Filipe**

Relatório de estágio realizado sob a orientação científica do  
Prof. Doutor Eusébio Joaquim Marques dos Reis  
e sob coorientação do Dr. Nelson Miguel Branco Mileu

Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial  
Aplicados ao Ordenamento

2015

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO



**AVALIAÇÃO E CARTOGRAFIA DA SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE  
DESLIZAMENTOS NA ILHA DA MADEIRA**

**Paulo Alexandre Galvão Filipe**

Relatório de estágio realizado sob a orientação científica do  
Prof. Doutor Eusébio Joaquim Marques dos Reis  
e sob coorientação do Dr. Nelson Miguel Branco Mileu

Estágio realizado na Municípiã, E.M., S. A.  
Empresa de Tecnologia e Informação Geográfica



**MESTRADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E MODELAÇÃO TERRITORIAL  
APLICADOS AO ORDENAMENTO**

2015



Ao meu Pai e à minha Mãe;  
À minha esposa e à minha filha;  
Aos que sabem que não sabem tudo.



# ÍNDICE GERAL

|  |      |
|--|------|
| Índice de Figuras .....  | v    |
| Índice de Quadros .....  | ix   |
| Agradecimentos.....  | xi   |
| Siglas e Acrónimos .....   | xiii |
| Resumo.....  | xv   |
| Abstract .....   | xvii |
| Introdução .....   | 1    |
| Contexto da realização do estágio.....   | 3    |
| Enquadramento legal do Plano Regional de Emergência de Proteção Civil da Região Autónoma da Madeira..... | 5    |
| CAPÍTULO 1. Enquadramento da Área de Estudo .....  | 7    |
| 1.1. Localização Geográfica.....   | 7    |
| 1.2. Caracterização Física Geral.....  | 8    |
| 1.3. População .....   | 15   |
| CAPÍTULO 2. Informação Geográfica: Aquisição e Processamento.....  | 17   |
| 2.1. A Aquisição de Informação e Construção da Base de Dados .....                                       | 17   |
| 2.2. Processo de Criação da Cartografia dos Deslizamentos.....   | 18   |
| CAPÍTULO 3. Movimentos de Vertente: caraterísticas e fatores condicionantes.....                         | 25   |
| 3.1. Os Movimentos de Vertente.....  | 25   |
| 3.2. Fatores Condicionantes e Distribuição Espacial dos Deslizamentos .....                              | 27   |
| 3.3. Correlação Entre Variáveis .....  | 52   |
| CAPÍTULO 4. Avaliação da Suscetibilidade à Ocorrência de Deslizamentos.....                              | 53   |
| 4.1. O Método Estatístico de Análise .....   | 53   |
| 4.2. A Suscetibilidade à Ocorrência de Deslizamentos.....  | 57   |
| 4.3. Validação dos Mapas de Suscetibilidade .....  | 63   |
| 4.4. Capacidade Preditiva dos Modelos .....  | 64   |
| 4.5. Classificação dos Dados de Suscetibilidade.....   | 71   |
| Considerações Finais.....  | 89   |
| Bibliografia .....   | 93   |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1-1 - Localização geográfica da RAM (exceto ilhas Selvagens). .....  | 7  |
| Figura 1-2 - Geologia Simplificada da Ilha da Madeira. Fonte: G. R. M e SRARN, 2010. ....   | 9  |
| Figura 1-3 - Hipsometria da ilha da Madeira. ....   | 11 |
| Figura 1-4 Distribuição espacial da Precipitação Anual Média (1961-1990) da ilha da Madeira.....  | 13 |
| Figura 1-5 - Rede hidrográfica principal e principais bacias hidrográficas da ilha da Madeira..   | 14 |
| Figura 2-1 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de Ribeira Brava: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010 .....  | 19 |
| Figura 2-2 - Deslizamentos inventariados por fotointerpretação (ortofotos de 2007 e de 2010) na ilha da Madeira. ....   | 20 |
| Figura 2-3 - Limites das áreas de análise consideradas no estudo. ....  | 21 |
| Figura 2-4 - Exemplo da identificação dos limites da área da faixa costeira (troço situado na localidade de Portinho, a este da Ponta da Atalaia). Bases cartográficas e fontes: ortofotos (DROTA, 2010); curvas de nível (DROTA, 2007). .... | 21 |
| Figura 3-1 - Distribuição espacial das classes de declive (em graus), na ilha da Madeira.....   | 28 |
| Figura 3-2 - Probabilidade condicionada (x100) por classe de declive (classificada com amplitudes de 1°). ....  | 29 |
| Figura 3-3 – Probabilidade condicionada (x100) por classe de declive .....  | 30 |
| Figura 3-4 - Exposições das vertentes da ilha da Madeira. ....  | 31 |
| Figura 3-5 – Probabilidade condicionada (x100) por classe de exposição de vertentes .....   | 32 |
| Figura 3-6 - Distribuição do Índice Topográfico de Humidade (ITH) na ilha da Madeira .....  | 33 |
| Figura 3-7 - Probabilidade condicionada (x100) por classe de (ITH). ....  | 34 |
| Figura 3-8 - Exemplo do perfil transversal de vertente obtido com base em várias resoluções..   | 37 |
| Figura 3-9 - Curvas de sucesso para a modelação da ocorrência de deslizamentos na ilha da Madeira, com diferentes tipos de perfis topográficos.....   | 38 |
| Figura 3-10 - Perfis Transversais das vertentes na ilha da Madeira.....   | 39 |
| Figura 3-11 - Probabilidade condicionada (x100) por classe de perfil de vertentes. ....   | 40 |
| Figura 3-12 - Distribuição espacial das unidades litológicas presentes na ilha da Madeira (Fonte: Silveira <i>et al.</i> , 2010). ....  | 41 |
| Figura 3-13 - Probabilidade condicionada (x100) por classe de unidades litológicas .....  | 44 |
| Figura 3-14 - Distribuição espacial dos tipos de solos presentes na ilha da Madeira (Fonte: Carta dos solos da ilha da Madeira, 1992).....  | 47 |
| Figura 3-15 - Probabilidade condicionada (x100) por classe de solo. ....  | 48 |
| Figura 3-16 - Distribuição espacial dos vários tipos de ocupação do solo.....   | 50 |
| Figura 3-17 - Probabilidade condicionada (x100) por classe de ocupação do solo. ....  | 51 |
| Figura 4-1 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 100 m <sup>2</sup> para a totalidade da ilha a Madeira. ....  | 58 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 4-2 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 500 m <sup>2</sup> para a totalidade da ilha da Madeira.....   | 59 |
| Figura 4-3 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 1000 m <sup>2</sup> para a totalidade da ilha da Madeira.....  | 59 |
| Figura 4-4 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 100 m <sup>2</sup> para o interior da ilha da Madeira.....   | 60 |
| Figura 4-5 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 500 m <sup>2</sup> para o interior da ilha da Madeira.....   | 60 |
| Figura 4-6 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 1000 m <sup>2</sup> para o interior da ilha da Madeira.....  | 61 |
| Figura 4-7 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 100 m <sup>2</sup> para a faixa costeira da ilha da Madeira. ....  | 61 |
| Figura 4-8 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 500 m <sup>2</sup> para a faixa costeira da ilha da Madeira. ....  | 62 |
| Figura 4-9 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 1000 m <sup>2</sup> para a faixa costeira da ilha da Madeira. ....   | 62 |
| Figura 4-10 - Distribuição dos deslizamentos utilizados na modelação (60%) e na validação (40%). ....  | 64 |
| Figura 4-11 - Curvas de sucesso (A) e de predição (B) dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos corridos com os três grupos de deslizamentos, aplicado à totalidade da ilha da Madeira.....   | 66 |
| Figura 4-12 - Curvas de sucesso (A) e de predição (B) dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos corridos com os três grupos de deslizamentos, aplicado ao interior da ilha da Madeira. ....   | 67 |
| Figura 4-13 - Curvas de sucesso (A) e de predição (B) dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos corridos com os três grupos de deslizamentos, aplicado à faixa costeira da ilha da Madeira. ....  | 67 |
| Figura 4-14 - Demonstração gráfica da curva de sucesso/predição e quantificação dos respectivos valores de AAC determinados em função de diferentes valores de área instabilizada no contexto da totalidade da área de estudo. Fonte: Oliveira (2012)... | 68 |
| Figura 4-15 - Curvas de predição dos modelos de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos: modelação com os deslizamentos do Interior da Ilha e validação com os deslizamentos da Faixa Costeira. ....   | 70 |
| Figura 4-16 - Identificação das classes de suscetibilidade a deslizamentos para a totalidade de ilha da Madeira, tendo em conta as quebras naturais das curvas de sucesso. ....  | 72 |
| Figura 4-17 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na totalidade da ilha da Madeira, para áreas deslizadas superiores a 100 m <sup>2</sup> . ....   | 73 |
| Figura 4-18 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na totalidade da ilha da Madeira, para áreas deslizadas superiores a 500 m <sup>2</sup> . ....   | 74 |
| Figura 4-19 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na totalidade da ilha da Madeira, para áreas deslizadas superiores a 1000 m <sup>2</sup> . ....  | 75 |
| Figura 4-20 - Delimitação das classes de suscetibilidade a deslizamentos para o interior da ilha, tendo em conta as quebras naturais das curvas de sucesso. ....   | 76 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4-21 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos no interior da ilha, para áreas deslizadas superiores a 100 m <sup>2</sup> . .....   | 77 |
| Figura 4-22 - Suscetibilidade a deslizamentos no interior da ilha, para áreas deslizadas superiores a 500 m <sup>2</sup> . .....   | 78 |
| Figura 4-23 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos no interior da ilha, para áreas deslizadas superiores a 1000 m <sup>2</sup> . .....  | 79 |
| Figura 4-24 - Delimitação das classes de suscetibilidade a deslizamentos para a faixa costeira, tendo em conta as quebras naturais das curvas de sucesso.....  | 80 |
| Figura 4-25 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na faixa costeira da ilha, para áreas deslizadas superiores a 100 m <sup>2</sup> . .....   | 81 |
| Figura 4-26 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na faixa costeira da ilha, para áreas deslizadas superiores a 500 m <sup>2</sup> . .....   | 82 |
| Figura 4-27 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na faixa costeira da ilha, para áreas deslizadas superiores a 1000 m <sup>2</sup> . .....  | 83 |
| Figura 4-28 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na ilha da Madeira, para áreas deslizadas superiores a 100 m <sup>2</sup> , resultante da união dos mapas de suscetibilidade do interior e da faixa costeira.....  | 84 |
| Figura 4-29 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na ilha da Madeira, para áreas deslizadas superiores a 500 m <sup>2</sup> , resultante da união dos mapas de suscetibilidade do interior e da faixa costeira.....  | 84 |
| Figura 4-30 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na ilha da Madeira, para áreas deslizadas superiores a 1000 m <sup>2</sup> , resultante da união dos mapas de suscetibilidade do interior e da faixa costeira..... | 85 |



## ÍNDICE DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1.1 - Área (km <sup>2</sup> ) e frequência relativa (%) por classe de altitude.....   | 12 |
| Quadro 1.2 - Área (km <sup>2</sup> ), população residente e densidade populacional (hab/km <sup>2</sup> ) por<br>concelho da ilha da Madeira. ....   | 15 |
| Quadro 2.1 - Síntese da Informação de Base utilizada no trabalho.....  | 17 |
| Quadro 2.2 - Características do inventário de deslizamentos na área de estudo. ....  | 22 |
| Quadro 2.3 - Fração (%) de área deslizada por concelho em relação ao total de área deslizada<br>de cada grupo de deslizamentos, para a totalidade da Iha da Madeira.....   | 23 |
| Quadro 2.4 - Frequência relativa de área deslizada, por grupo de deslizamentos tendo como<br>limite o interior da ilha. ....   | 24 |
| Quadro 2.5 - Frequência relativa de área deslizada, por grupo de deslizamentos, tendo em<br>conta o limite da faixa costeira. ....   | 24 |
| Quadro 3.1 - Classificação dos deslizamentos proposta por DIKAU <i>et al.</i> 1996, <i>in</i> Zêzere<br>(1997).....  | 27 |
| Quadro 3.2 - Frequência das classes de declive (ha e %) e fração (ha e %) do total da área<br>deslizada em cada classe de declive. ....  | 29 |
| Quadro 3.3 - Frequência das classes de exposição (ha e %) e fração (ha e %) do total da área<br>deslizada em cada classe de exposição .....  | 32 |
| Quadro 3.4 - Frequência das classes de ITH (ha e %) e fração (%) do total da área deslizada<br>em cada classe de ITH .....   | 34 |
| Quadro 3.5 - Frequência relativa (%) da área de cada classe de (ITH) por classe de declive.....  | 35 |
| Quadro 3.6 - Graus de ajuste (AAC) aos movimentos de vertente dos vários tipos de perfis<br>topográficos .....   | 38 |
| Quadro 3.7 - Frequência das classes de perfil (ha e %) e fração (%) do total da área deslizada<br>em cada classe de perfil. ....   | 39 |
| Quadro 3.8 - Frequência das classes litológicas (ha e %) e fração (%) do total da área<br>deslizada em cada classe litológica.....   | 42 |
| Quadro 3.9 - Frequência das classes de solo, (ha e %) e fração (%) do total da área deslizada<br>em cada classe de solo. ....  | 48 |
| Quadro 3.10 - Frequência das classes de ocupação do solo (ha e %) e fração (%) do total da<br>área deslizada em cada classe de ocupação do solo.....   | 51 |
| Quadro 3.11 - Grau de associação (%) entre fatores condicionantes à ocorrência dos<br>deslizamentos, com base no Coeficiente de Contingência Modificado.....   | 52 |
| Quadro 4.1 - Valor Informativo (scores) para cada classe de cada fator condicionante,<br>resultante dos 9 modelos efetuados (destacam-se com o fundo cinzento os valores<br>mais baixos e a negrito os valores mais elevados)..... | 54 |
| Quadro 4.2 - Grau de ajuste (AAC) dos resultados dos modelos aos deslizamentos<br>registados, tendo em conta cada grupo de deslizamentos, para cada área de<br>estudo.....   | 68 |
| Quadro 4.3 - Valores de AAC máximos e mínimos, consoante a percentagem de área<br>deslizada, tendo em conta cada grupo de deslizamentos e área de estudo.....  | 69 |

|   |    |
|---|----|
| Quadro 4.4 - Qualidade preditiva (AAC) dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos, tendo em conta a área interior da ilha para modelar e a faixa costeira para validar.                                     | 70 |
| Quadro 4.5 - Valores de VI utilizados na delimitação das classes de suscetibilidade para a totalidade da ilha da Madeira.....   | 73 |
| Quadro 4.6 - Frequência relativa (%) da área da classe e área deslizada, face à totalidade da área de estudo, e a probabilidade condicionada de área deslizada por classe de suscetibilidade.....               | 75 |
| Quadro 4.7 - Valores de VI utilizados na delimitação das classes de suscetibilidade. ....   | 77 |
| Quadro 4.8 - Frequência relativa (%) da área da classe e área deslizada, face ao interior da ilha da Madeira, e a probabilidade condicionada de área deslizada por classe de suscetibilidade.....               | 79 |
| Quadro 4.9 - Valores de VI utilizados na delimitação das classes de suscetibilidade. ....   | 81 |
| Quadro 4.10 - Frequência relativa (%) da área da classe e área deslizada, face à totalidade da área da faixa costeira e deslizada, e a frequência relativa da área deslizada na classe de suscetibilidade. .... | 83 |
| Quadro 4.11 - Frequência relativa (%) da área da classe e área deslizada, face à totalidade da ilha da Madeira. ....  | 85 |
| Quadro 4.12 - Área coincidente (%) das classes de suscetibilidade muito elevada e elevada dos mapas elaborados com diferentes magnitudes de deslizamentos. ....   | 86 |

## AGRADECIMENTOS

As minhas primeiras palavras de agradecimento vão para o meu Pai, que sempre foi para mim um motivo de orgulho e uma fonte de inspiração. Foi nele que me apoiei nos momentos mais difíceis desta nova etapa da minha vida e onde eu encontrei força e motivação para continuar. Para Ti, um beijo e um abraço apertado, estejas lá onde estiveres. Um agradecimento também muito especial à minha Mãe, pela educação que me deu e pelos valores que me transmitiu. À minha esposa e filha pelo apoio incondicional em todos os momentos e compreensão demonstrada perante a minha ausência na vida familiar em alguns momentos das nossas vidas.

Gostaria de deixar um agradecimento muito especial ao Professor Doutor Eusébio Marques dos Reis, desde logo por aceitar se meu orientador, facto que muito me honra, mas também pelo seu valioso contributo técnico e científico para o presente relatório, bem como pela disponibilidade sempre demonstrada e horas por ele despendidas para a revisão do texto.

Aos docentes do IGOT, nomeadamente ao Professor Ricardo Garcia e à Dr<sup>a</sup> Susana Pereira, por me disponibilizarem bibliografia relevante para a concretização deste relatório.

Um agradecimento também muito especial à Municipia EM. SA, na qualidade de entidade acolhedora do estágio, mais concretamente à Divisão de Informação Geográfica, por todas as condições e meios necessários a realização do estágio.

Gostaria também de agradecer com especial relevo ao Dr. Nelson Miguel Branco Mileu, que, para além de permitir a realização deste estágio, muito contribuiu na coorientação deste relatório, com inúmeros ensinamentos técnicos e científicos que foram essenciais para o resultado final.

Aos colegas do Mestrado, Vítor Silva, Bernardo Sargento e Eduardo Simões, por me terem “aturado” e partilharem comigo momentos de aprendizado.

Ao grupo das “sextas-feiras” por compreenderem a minha ausência, numa tradição com mais 20 anos. Aos colegas e amigos em geral.

A todos o meu “muito OBRIGADO”!



## SIGLAS E ACRÓNIMOS

AAC – Área Abaixo da Curva

AMRAM – Associação dos Municípios da Região Autónoma da Madeira

ANPC – Autoridade Nacional de Proteção Civil

COS – Carta Ocupação do Solo

DIG – Divisão de Informação Geográfica

DRA-RAM – Direção Regional de Agricultura da Região Autónoma da Madeira

DRCC-RAM – Direção Regional de Cartografia e Cadastro da Região Autónoma da Madeira

DRE-RAM – Direção Regional de Estatística da Região Autónoma da Madeira

DRF-RAM – Direção Regional da Floresta da Região Autónoma da Madeira

ESRI – *Environmental Systems Research Institute*

GR-RAM – Governo Regional da Região Autónoma da Madeira

IGP – Instituto Geográfico Português Atual Direção Geral do Território

INE – Instituto Nacional de Estatística

IPMA – Instituto Português do Mar e Atmosfera

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MDT – Modelo Digital de Terreno

PDM – Plano Diretor Municipal

PME-PC – Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil

PRECRAM – Plano Regional de Emergência de Proteção Civil da Região Autónoma da Madeira

PROT-RAM – Plano Regional de Ordenamento do Território da Região Autónoma da Madeira

RAM – Região Autónoma da Madeira

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SRA-RAM – Secretaria Regional de Agricultura da Região Autónoma da Madeira

SRARN-RAM – Serviço Regional de Ambiente e Recursos Naturais da Região Autónoma da Madeira

TIN – Triangular Irregular Network

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

VI – Valor Informativo

WP/WLI - *Working Party on World Landslide Inventory*





## RESUMO

Este trabalho constitui um relatório de estágio, enquadrado na elaboração do Plano Regional de Emergência de Proteção Civil da Região Autónoma da Madeira, designadamente na cartografia e análise da suscetibilidade a deslizamentos.

Foi efetuado um inventário dos deslizamentos (variável dependente) através de fotointerpretação de imagens de grande resolução (30 cm) e agrupados por magnitude de área deslizada:  $> 100 \text{ m}^2$ ,  $> 500 \text{ m}^2$  e  $> 1000 \text{ m}^2$ . Estes deslizamentos foram posteriormente cruzados com sete fatores condicionantes: declives, exposições, índice topográfico de humidade, perfil transversal das vertentes, litologia, solos e ocupação do solo. Este procedimento permitiu aferir qual a probabilidade condicionada de se encontrar área deslizada em cada classe de fator condicionante.

A suscetibilidade a deslizamentos foi avaliada quantitativamente utilizando um método de base estatística: o Valor Informativo. Por se considerar que existem dinâmicas diferentes a influenciar os deslizamentos, a análise da suscetibilidade foi realizada separadamente em três setores tendo em conta a totalidade da ilha, a faixa costeira, e interior da ilha.

Para a validação do modelo foi realizada uma partição espacial dos deslizamentos tendo sido um grupo utilizado para modelar e outro para validar. Foi igualmente analisado em que medida os deslizamentos ocorridos na faixa costeira conseguiam prever deslizamentos no interior da ilha.

Os valores obtidos das curvas de sucesso e de predição revelaram-se satisfatórios, sendo os valores das respetivas AAC mais elevados quando se corre o modelo com deslizamentos de maior magnitude, apesar de haver uma grande coincidência da distribuição espacial da suscetibilidade entre os grupos de deslizamentos de diversas dimensões. Constatou-se igualmente que os deslizamentos da faixa costeira não validam os deslizamentos ocorridos no interior da ilha; a análise da suscetibilidade na ilha da Madeira dá melhores resultados quando realizada separadamente para a faixa costeira e para o interior da ilha, do que modelando com a área total.

**Palavras-chave:** Deslizamentos, Suscetibilidade, Valor Informativo, ilha da Madeira



## ABSTRACT

This report results from a professional internship, integrated in the development of the “Plano Regional de Emergência de Proteção Civil da Região Autónoma da Madeira (PRECRAM), specifically in mapping and analysis of landslides susceptibility.

A landslide (dependent variable) inventory was made through large resolution images (30 cm) using visual photo interpretation, and grouped by magnitude area:  $>100\text{ m}^2$ ,  $>500\text{ m}^2$  and  $>1000\text{ m}^2$ . These landslides were then related with seven conditioning factors, based on a 10 m resolution matrix: slope, aspect, topographic index, slope profile, lithology, soil and land use. This procedure allowed calculating the conditional probability of finding landslide areas in the several classes of each conditioning factor.

The landslide susceptibility was evaluated quantitatively using a statistical-based method: the Information Value. Since it was considered that landslides can be influenced by different dynamics in different spatial contexts the, susceptibility analysis was performed separately in three spatial units: the totality of the island, the coastal belt and the inland.

For validation purposes, a spatial random partition of the landslides was done, in which one group was used for modelling and the other one to result validation. It was also analysed in what extent the landslides in the coastal belt can be used for inland landslides prediction.

The values of the success and prediction curves have proved to be satisfactory, with higher values of the respective Area Under the Curve (AUC) when running the model with the largest magnitude landslides, although there is a coincidence of the spatial distribution of susceptibility among the landslide groups with different sizes. It was also found that the landslides in coastal belt do not validate those occurred in the inland sector of the island; the susceptibility analysis on the Madeira Island gives better results when performed separately for the coastal belt and the inner island, than the total area is used for modelling.

**Key words:** landslides, susceptibility, Informative value, Madeira Island.



## INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a Madeira tem vindo a afirmar-se cada vez mais como um importante destino turístico, tendo como consequência o aumento da construção de novos equipamentos turísticos e das respetivas infraestruturas que lhes servem de apoio.

Como é sabido, muitas das catástrofes naturais relacionadas com os movimentos de massas em vertente devem-se frequentemente, à procura de novos espaços de construção, levando à ocupação de áreas inadequadas ou sensíveis a este tipo de fenómenos.

A crescente consciencialização para estes riscos, fruto da mediatização de alguns eventos, que provocaram avultados danos materiais e humanos, como o que ocorreu na ilha da Madeira a 20 de fevereiro de 2010, levou diversas instituições da administração regional e local a tomarem medidas que reduzam a exposição de pessoas e bem ao risco.

No sentido de mitigar e atenuar estes danos e perdas provocados por estes eventos, têm sido instituídos e implementados planos e instrumentos de gestão, planeamento e ordenamento do território.

O PREPCRAM, no qual se insere este trabalho permitirá antecipar cenários suscetíveis de desencadear um acidente grave ou catástrofe.

Este trabalho foi realizado com recurso a ferramentas de SIG, permitindo a integração de dados espaciais essenciais ao emprego do método do Valor Informativo utilizado na avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos à escala regional.

Este estudo tem como principal objetivo a avaliação quantitativa e cartografia da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente (deslizamentos) na ilha da Madeira. Para que tal objetivo seja alcançado foram estabelecidos outros objetivos específicos:

- 1) Identificação e cartografia dos deslizamentos, bem como dos principais fatores que os condicionam;
- 2) Construção e validação de mapas de suscetibilidade em ambiente SIG, elaborados para diferentes áreas e com deslizamentos de diferentes magnitudes;
- 3) Avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos para diferentes magnitudes de área deslizada, no sentido de detetar em que medida deslizamentos

de diferentes dimensões podem ser afetados de forma distinta pelos mesmos fatores;

- 4) Avaliação da relação entre a ocorrência de deslizamentos e fatores condicionantes para diferentes setores - totalidade da ilha, faixa costeira e interior – no sentido de verificar a coerência da sua utilização conjunta.

O trabalho está organizado em quatro capítulos, sendo o primeiro capítulo dedicado ao enquadramento da área de estudo, no que respeita a localização geográfica, características físicas e demográficas.

O segundo capítulo faz referência à aquisição da informação e à construção da base de dados, fundamentais para a realização do estudo. É neste capítulo que é descrito o processo de inventariação dos deslizamentos e as suas características.

O terceiro capítulo aborda os conceitos gerais em torno dos movimentos de vertente. Faz uma análise espacial dos fatores condicionantes e quantifica a probabilidade condicionada de se encontrar deslizamentos em cada classe em cada um deles. Neste capítulo é feita a verificação do grau de associação entre fatores condicionantes.

O quarto capítulo descreve o método estatístico, Valor Informativo, e faz-se a sua aplicação para cálculo dos mapas de suscetibilidade, tendo como objeto 3 dimensões de deslizamentos e 3 setores da ilha da Madeira, fazendo-se ainda a validação, análise e classificação dos resultados.

## CONTEXTO DA REALIZAÇÃO DO ESTÁGIO

O presente relatório teve subjacente a realização de um estágio curricular, o qual teve como objetivo principal a obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial aplicados ao Ordenamento (SIGMTO), dando cumprimento ao disposto no regulamento de estágios profissionais no âmbito dos cursos de 2.º ciclo do IGOT. O mencionado estágio decorreu nos meses de outubro de 2013 a março de 2014, na empresa Municípiã, E.M, S.A., mais concretamente na sua Divisão de Informação Geográfica (DIG).

O presente relatório integra-se no PREPCRAM, na componente de movimentos de massa em vertentes, com destaque para a avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos. Apesar de não serem descritos neste relatório, houve ainda oportunidade no decorrer do período de estágio participar na avaliação da suscetibilidade a outros riscos para o referido PREPCRAM nomeadamente:

- Cheias e Inundações Urbanas;
- Inundações e Galgamentos Costeiros;
- Aluvião;
- Erosão Costeira;
- Acidentes no Transporte Terrestre de Mercadorias Perigosas;
- Acidentes em Instalações de Combustíveis, Óleos e Lubrificantes;
- Acidentes em Estabelecimentos de Armazenagem de Produtos Explosivos;
- Incêndios em Túneis;
- Epidemias.

Importa ainda referir, que para cada um dos riscos referidos, foi efetuado um trabalho de classificação qualitativa do risco com base na matriz de risco proposta em ANPC (2009a), que relaciona o grau de gravidade e de probabilidade associados ao risco em análise. Foi igualmente efetuado um cruzamento das áreas classificadas com suscetibilidade elevada, resultantes do modelo aplicado, com os elementos expostos.

Como facilmente se compreende, por questões de disponibilidade de tempo e de espaço, assim como de coerência metodológica e temática, neste Relatório apenas se apresenta a componente relativa aos deslizamentos.





## **ENQUADRAMENTO LEGAL DO PLANO REGIONAL DE EMERGÊNCIA DE PROTEÇÃO CIVIL DA REGIÃO AUTÓNOMA DA MADEIRA**

Um dos objetivos principais da Proteção Civil visa a prevenção de riscos coletivos e da ocorrência de acidente grave ou de catástrofe, exercendo-se a sua atividade em diversos domínios como o levantamento, previsão, avaliação e prevenção dos riscos coletivos. Compete ainda à Proteção Civil, a análise permanente das vulnerabilidades perante situações de risco e a informação e formação das populações, visando a sua sensibilização em matéria de autoproteção (ANPC, 2009b).

O presente estudo enquadra-se no Decreto Legislativo Regional n.º 16/2009/M, de 30 de Junho de 2009, que aprova o regime jurídico do Sistema de Proteção Civil da Região Autónoma da Madeira.

No que respeita aos movimentos de vertente, encontra-se conforme o Decreto-Lei n.º 166/2008, de 22 de agosto, que estabelece o Regime Jurídico da Reserva Ecológica Nacional, abreviadamente designada por REN, corrigido e complementado pelo Decreto-Lei n.º 239/2012 de 2 de novembro, o qual define que “as áreas que, devido às suas características de solo e subsolo, declive, dimensão e forma da vertente ou escarpa e condições hidrogeológicas, estão sujeitas à ocorrência de movimentos de massa em vertentes, incluindo os deslizamentos, os desabamentos e a queda de blocos” (Diário da República, 1.ª série - N.º 212 - 2 de novembro de 2012, Secção III, alínea e).



## CAPÍTULO 1. ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

### 1.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

A ilha da Madeira localiza-se no setor oriental do Atlântico Norte, a cerca de 700 km a oeste da costa de Marrocos e 850 km a sudoeste de Portugal Continental (Figura 1-1). O seu território é limitado geograficamente pelos paralelos 32° 38' e 32° 52', de latitude norte, e pelos meridianos 16° 39' e 17° 16', de longitude oeste de Greenwich. Apresenta no geral uma forma alongada, com cerca de 58 km de comprimento máximo, segundo a direção E-O, e 23 km de largura máxima, segundo a direção N-S.

A Madeira é a maior ilha do Arquipélago da Madeira, com uma área de aproximadamente 741 km<sup>2</sup>, no qual se incluem as ilhas de Porto Santo (43 km<sup>2</sup>), Desertas (14 km<sup>2</sup>) e Selvagens (4 km<sup>2</sup>) perfazendo um total de 802 km<sup>2</sup> de área emersa. Este grupo de ilhas, juntamente com os arquipélagos dos Açores, Canárias e Cabo Verde, constitui a região biogeográfica da Macaronésia.



Figura 1-1 - Localização geográfica da RAM (exceto ilhas Selvagens).

Fonte: Adaptado de *Google Maps*.

## 1.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA GERAL

### 1.2.1. Geologia

Segundo Carvalho e Brandão (1991), a maioria das formações geológicas emersas da ilha da Madeira são rochas vulcânicas extrusivas repartidas por dois conjuntos bem diferenciados:

- Rochas Lávicas, efusivas, provenientes de derrames ou escoadas basálticas de variadas espessuras;
- Rochas piroclásticas, consequentes da atividade explosiva, mais abundantes na área central da Ilha onde são mais grosseiras e desordenadas.

De acordo com Silveira *et al.* (2010), a ilha da Madeira comporta uma estratigrafia composta por três complexos vulcânicos resultantes de três fases principais de construção do grande vulcão escudo da Madeira: Complexo Vulcânico Inferior (CVI) (> 5,57 Ma), Complexo Vulcânico Intermédio (CVM) (5,57 - 1,8 Ma) e Complexo Vulcânico Superior (CVS) (1,8 - 0,007 Ma). Cada um dos complexos supramencionados subdivide-se em outras unidades estratigráficas delimitadas por inconformidades regionais devido a diferentes estádios de evolução do aparelho vulcânico, evidenciando descontinuidades na sucessão estratigráfica no que respeita à sua relação geométrico-temporal. Neste contexto, foram identificadas sete unidades Vulcano-estratigráficas principais:

- Unidade do Porto da Cruz (CVI1) e Unidade dos Lameiros (CVI2), no Complexo Vulcânico Inferior;
- Unidade da Encumeada (CVM1), Unidade de Penha d'Águia (CVM2) e Unidade do Curral das Freiras (CVM3) no Complexo Vulcânico Intermédio;
- Unidade dos Lombos (CVS1) e Unidade do Funchal (CVS2), no Complexo Vulcânico Superior (Figura 1-2).

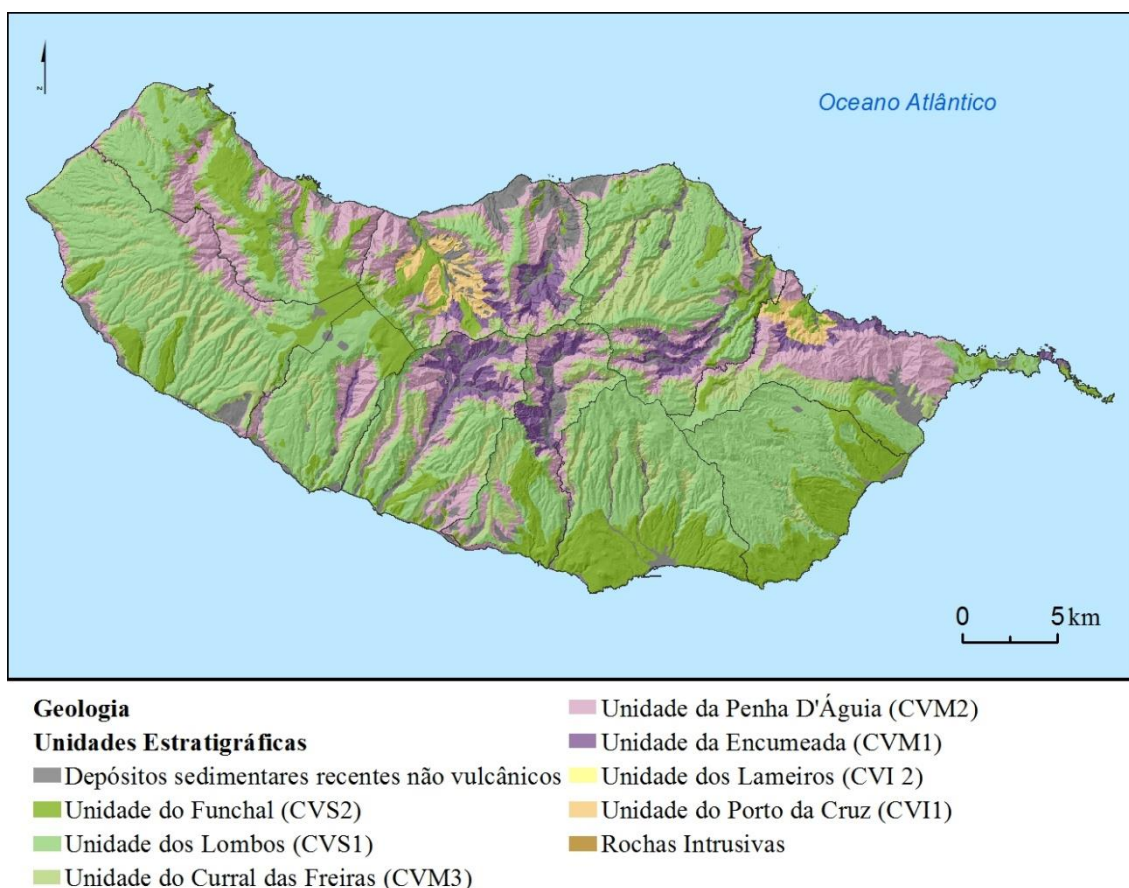


Figura 1-2 - Geologia Simplificada da Ilha da Madeira. Fonte: G. R. M e SRARN, 2010.

Para além destas formações foram ainda identificados depósitos sedimentares recentes não vulcânicos, tais como: aluviões (a), cascalheiras e areias de praia (cap), depósitos de vertente e coluviões (dv), depósitos de movimentos de massa (dm), depósitos de areias eólicas (ad), depósitos glaciares e periglaciares, (dgp) e depósitos de *lahar* (la) e ainda rochas intrusivas, com afloramentos de pequenas dimensões (100 m por 75 m no maior dos casos). Esta unidade representa 7,5% da área emersa da ilha.

A **Unidade do Porto da Cruz (CVI1)** contém os materiais mais antigos da ilha da Madeira atualmente expostos, constituída por rochas muito alteradas (hialoclastitos, brechas hialoclastíticas e derrames lávicos submarinos). Aflora apenas em duas regiões: na área de Porto da Cruz (do litoral até à cota 390 m) e no interior do vale de S. Vicente (70 m a 700 m de altitude). Representa cerca de 1,3% da área emersa da ilha da Madeira.

A **Unidade dos Lameiros (CVI2)** é constituída por uma sequência de sedimentos carbonatados marinhos de baixa profundidade que assenta em inconformidade sobre CVI1. Aflora unicamente na margem direita da Ribeira de S. Vicente, próximo do sítio dos Lameiros, concelho de São Vicente. Praticamente não tem expressão na área emersa da ilha, com apenas cerca de 0,003%.

A **Unidade da Encumeada (CVM1)** é resultado de produtos vulcânicos subaéreos de composição essencialmente máfica, por vezes muito alterados. Aflora na região da Encumeada, mais precisamente nas áreas de cabeceira da Ribeira de Serra de Água e da Ribeira de S. Vicente, entre 160 m e 970 m de altitude, sem no entanto atingir a linha de fecho que separa as duas bacias. Esta unidade representa 4,7% da área total emersa da ilha.

A **Unidade da Penha D'Águia (CVM2)** compreende sequências vulcânicas máficas (basanitos e basaltos) resultantes de atividade efusiva e explosiva subaérea, assim como sequências sedimentares epiclásticas. Aflora em quase toda a ilha, em particular, nos taludes das arribas litorais de maior comando ou nas vertentes abruptas dos vales mais encaixados, estando geralmente coberta pelas unidades mais recentes ("Unidade do Curral das Freiras - CVM3"). Esta unidade representa, 17,2% da área total emersa da ilha.

A **Unidade do Curral das Freiras (CVM3)** é constituída no geral da ilha, por sequências lávicas com ocasionais intercalações de depósitos piroclásticos de queda (escórias, *lapilli* e cinzas basálticas), níveis de tufitos e ocasionais produtos máficos de atividade freato-magmática. Aflora em quase toda a extensão da costa ocidental, nas arribas do litoral norte e nas encostas dos vales mais profundos do interior da ilha. Representa 17% da área emersa da ilha

A **Unidade dos Lombos (CVS1)** é constituída por derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basanitos e basaltos) por vezes com intercalações de tufitos, depósitos piroclásticos de queda (escórias, *lapilli* e cinzas basálticas). Correspondem a superfícies subestruturais, pouco erodidas, que compõem o topo de escoadas lávicas provenientes de centros eruptivos situados predominantemente nas regiões altas da ilha, que correram em direção ao litoral. Esta unidade representa 35,3% da área emersa da ilha.

A **Unidade do Funchal (CVS2)**, tal como o nome indica, encontra-se bem exposta na região do Funchal mas também em Câmara de Lobos apesar de aflorar um pouco por toda a ilha. É constituída por derrames lávicos de composição máfica (basaltos s.l.) com intercalações ocasionais de piroclastos de queda (escórias, *lapilli* e cinzas basálticas) e produtos de atividade freato-magmática. Esta unidade representa 17% da área emersa da ilha.

Verifica-se, assim, que os materiais do CVS e do CVM cobrem 91,2% da área da ilha da Madeira (52,3% e 38,9% respetivamente).

### 1.2.2. Relevo

A orografia da Madeira é caracterizada por montanhas, serras e planaltos com altitudes elevadas, resultando num relevo vigoroso com vales bastante encaixados, cujas ribeiras são de um modo geral ladeadas por enormes vertentes escarpadas (Figura 1-3). Situados na região central, o Pico Ruivo com 1861 m, e o Pico do Areeiro com 1810 m acima do nível do mar, são os pontos mais elevados da ilha. Para oeste dominam os planaltos com uma altitude média de 1400 m, de onde sobressai o planalto do Paul da Serra com 1620 m.

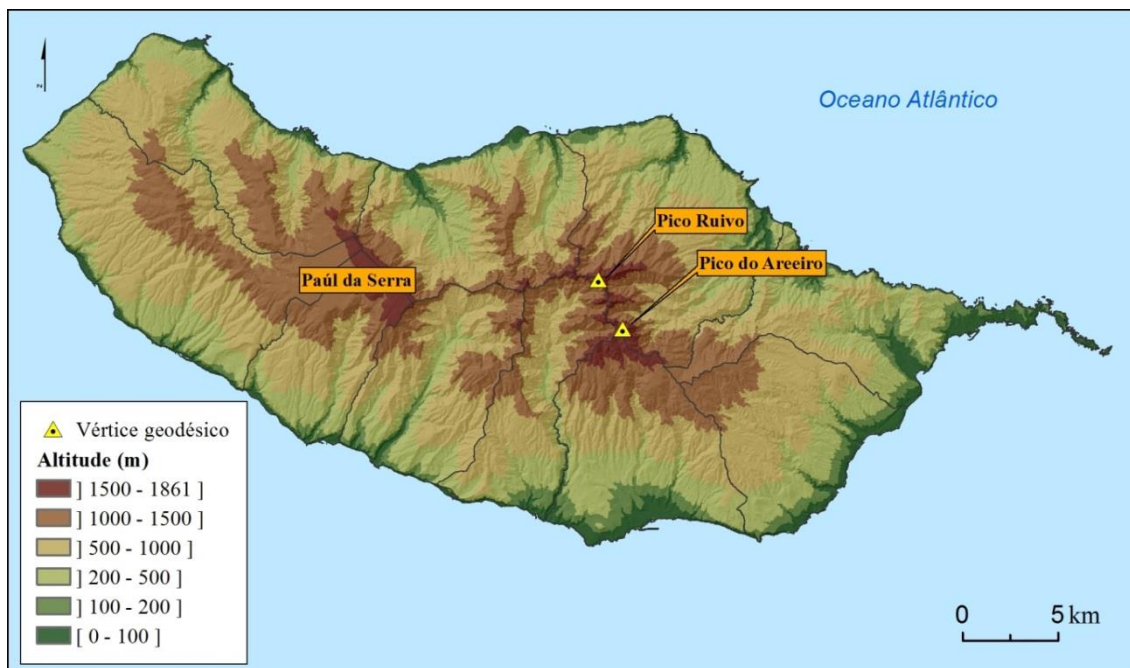


Figura 1-3 - Hipsometria da ilha da Madeira.



Observando o Quadro 1.1, verifica-se que 63,8% da ilha encontra-se em altitudes superiores a 500 m e 88,5% acima de 200 m, sendo que apenas 11,5% da ilha encontra-se abaixo de 200 m, dos quais 5,4% abaixo de 100 m, como é o caso de parte da cidade do Funchal.

Quadro 1.1 - Área (km<sup>2</sup>) e frequência relativa (%) por classe de altitude.

| Altitude (m)  | Área (km <sup>2</sup> ) | Área (%) |
|---------------|-------------------------|----------|
| [0 – 100]     | 39,8                    | 5,4      |
| ]100 – 200]   | 45,4                    | 6,1      |
| ]200 – 500]   | 183,1                   | 24,7     |
| ]500 – 1000]  | 300,7                   | 40,5     |
| ]1000 – 1500] | 152,4                   | 20,6     |
| ]1500 – 1861] | 20,3                    | 2,7      |

### 1.2.3. Clima

A ilha da Madeira apresenta um clima temperado com verão seco e temperado (Csb) na maior parte da Ilha, onde a temperatura média do mês mais quente é menor ou igual a 22 °C e com quatro meses, ou mais, com temperatura média superior a 10 °C. Contudo, o clima é temperado com verão seco e quente (Csa) na costa sul nas áreas de baixa altitude, onde temperatura média do mês mais quente é superior a 22 °C.

O clima na Madeira é influenciado, sobretudo, pela intensidade e localização do anticiclone subtropical dos Açores, mas também pelo relevo, bem como pela configuração e a orientação da ilha (Lopes 2011). O relevo, além do efeito da altitude, induz diferenciação climática local, consequência da configuração alongada da ilha e da sua orientação segundo a direção E-W perpendicular à direção dominante do vento. Estes condicionamentos produzem temperaturas do ar e precipitações distintas à mesma cota em encostas com diferente exposição aos ventos dominantes. (Silveira *et al.*, 2010).

Para esta análise foram consideradas as “normais climatológicas de referência” (1961 – 1990), das estações do Areeiro, Bom Sucesso, Camacha, Porto Moniz e Sanatório, Funchal, Lugar de Baixo, Santa Catarina (aeroporto), Bica da Cana, Santana e Santo da Serra.

A ilha da Madeira apresenta uma temperatura mínima média mensal do ar que varia entre os 5,6 °C no Pico do Areeiro e 16,5°C de Santa Catarina. Quanto à temperatura média máxima, esta oscila entre 12,2°C no Pico do Areeiro e 23,1°C no Lugar de Baixo. A temperatura média anual da ilha da Madeira varia entre 8,9°C e 19,7°C.

De acordo com Santos e Aguiar (2006) a média da precipitação anual na ilha da Madeira varia entre menos de 600 mm na região do Funchal e mais de 3000 mm nas áreas mais elevadas. A distribuição da precipitação anual apresenta igualmente uma assimetria norte-sul, onde à mesma altitude os valores de precipitação são mais elevados na costa norte do que na costa sul. Ainda de acordo com Santos e Aguiar (2006), a precipitação acumulada de inverno ultrapassou em média 1200 mm nas regiões mais elevadas, em oposição a 300 mm registados no Funchal e no vale de Machico. No verão foram registados valores de precipitação de 150 mm nas regiões mais elevadas, exceto no Areeiro, enquanto na costa sul os valores de precipitação não ultrapassam 500 mm.

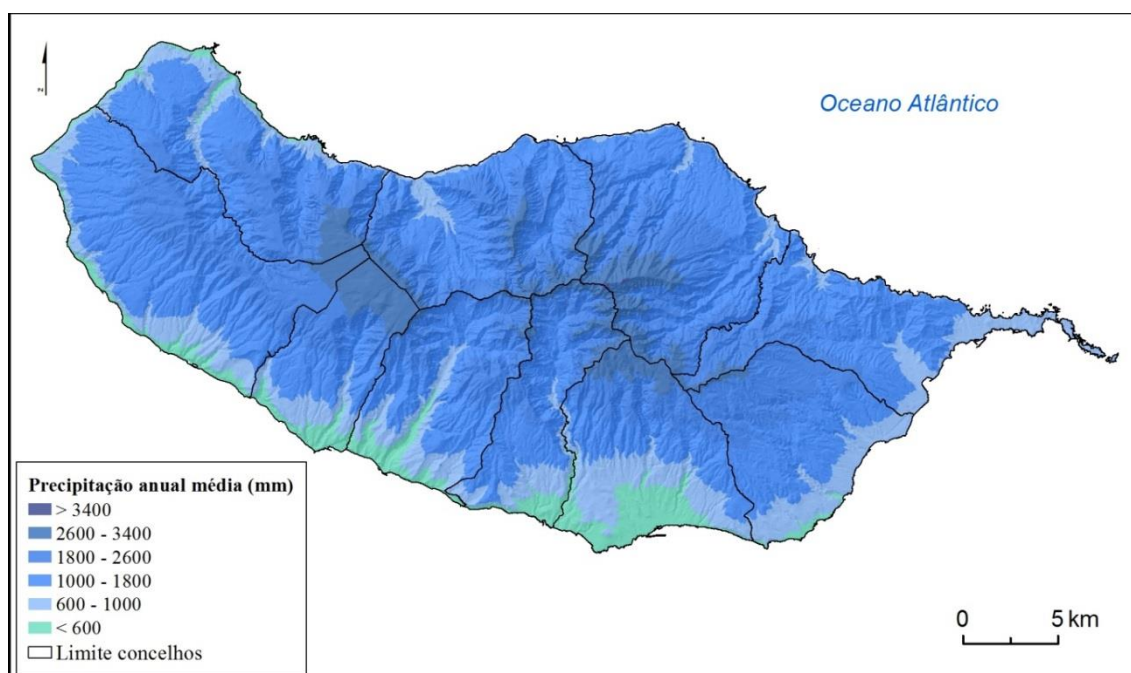


Figura 1-4 Distribuição espacial da Precipitação Anual Média (1961-1990) da ilha da Madeira  
Elaborado pela Municíпия, no âmbito do PREPCRAM.

### 1.2.4. Hidrografia

A ilha da Madeira apresenta, na sua maioria, uma rede hidrográfica com uma disposição radial. Salvo algumas exceções, os cursos de água principais mantêm um alinhamento retilíneo desde a nascente até à foz (Figura 1-5). Essa rede hidrográfica é bastante recente, com reduzida importância da erosão lateral das vertentes e das capturas, e com perfis longitudinais com declives acentuados que se observam mesmo nas ribeiras com maior grau de maturidade (Silva *et al.* 2010); grande parte dos cursos de água apresenta desníveis superiores a 1200 m e extensões que raramente excedem 20 km.

Devido ao relevo acentuado da ilha e ao regime de precipitação, os cursos de água são de carácter torrencial, apresentando características próprias de rios de montanha, correndo em vales bastante encaixados (PRAM, 2003).

A vertente norte da ilha contém numerosas e pequenas ribeiras, que, mesmo no verão, exibem algum caudal, embora seja diminuto. Contrariamente, as ribeiras da vertente sul da ilha praticamente secam no período estival (PRAM, 2003).

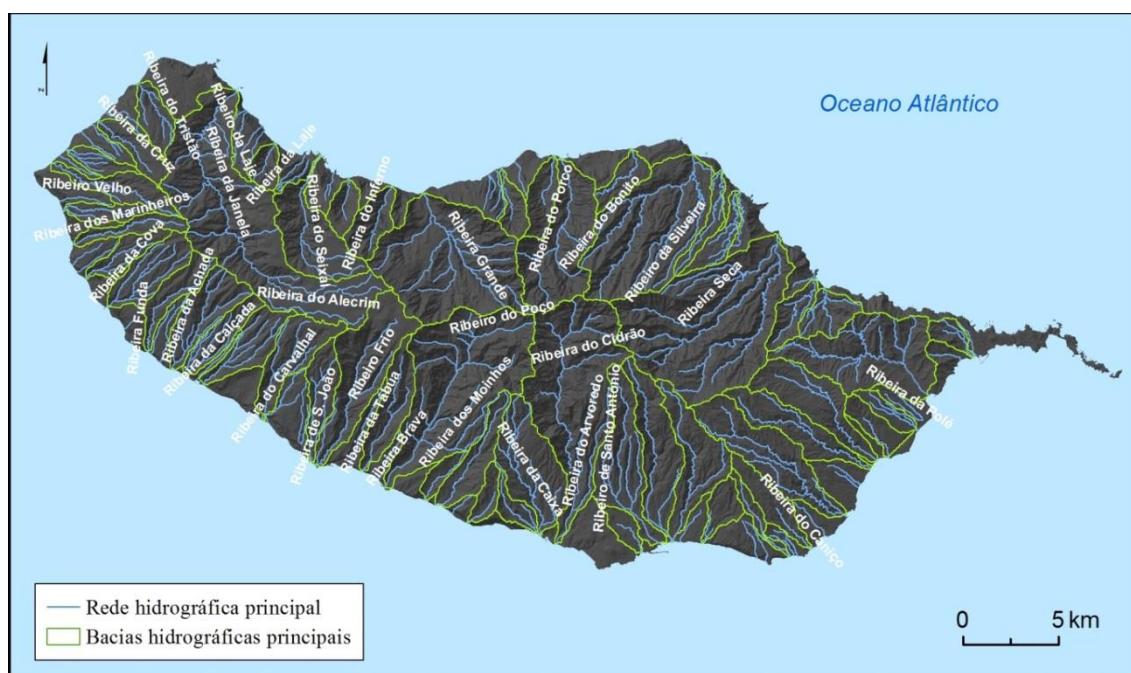


Figura 1-5 - Rede hidrográfica principal e principais bacias hidrográficas da ilha da Madeira. Extraída da cartografia topográfica à escala 1:5000, Fonte DROTA

### 1.3. POPULAÇÃO

A ilha da Madeira, de acordo com os censos 2011, registava uma população de 262302 residentes.

Como se observa no Quadro 1.2, o Funchal, com 111892 habitantes, é o concelho mais populoso, seguido dos concelhos confinantes, Santa Cruz e Câmara de Lobos, com 43005 e 35666 habitantes, respetivamente. A população destes três concelhos representa um total de 72,1% do total da população de R.A.M, contribuindo para essa percentagem o Funchal com 41,8%, Santa Cruz com 16,1% e Câmara de Lobos com 13,3%.

A densidade populacional na ilha da Madeira é de 354 hab/km<sup>2</sup>, sendo o concelho do Funchal aquele que regista maior densidade populacional, 1525 hab/km<sup>2</sup>, seguido dos concelhos de Câmara de Lobos e Santa Cruz, com 684 e 637 hab/km<sup>2</sup>, respetivamente.

Quadro 1.2 - Área (km<sup>2</sup>), população residente e densidade populacional (hab/km<sup>2</sup>) por concelho da ilha da Madeira.

| Concelhos              | Área (km <sup>2</sup> ) | População residente (2011) |       | Densidade populacional (hab/km <sup>2</sup> ) |
|------------------------|-------------------------|----------------------------|-------|---|
|                        |                         | (N.º)                      | (%)   |   |
| <b>Calheta</b>         | 111,52                  | 11521                      | 4,3   | 103   |
| <b>Câmara de Lobos</b> | 52,15                   | 35666                      | 13,3  | 684   |
| <b>Funchal</b>         | 73,35                   | 111892                     | 41,8  | 1525  |
| <b>Machico</b>         | 68,31                   | 21828                      | 8,2   | 320   |
| <b>Ponta do Sol</b>    | 46,19                   | 8862                       | 3,3   | 192   |
| <b>Porto Moniz</b>     | 82,93                   | 2711                       | 1,0   | 33  |
| <b>Ribeira Brava</b>   | 65,43                   | 13375                      | 5,0   | 204   |
| <b>Santa Cruz</b>      | 67,53                   | 43005                      | 16,1  | 637   |
| <b>Santana</b>         | 95,56                   | 7719                       | 2,9   | 81  |
| <b>São Vicente</b>     | 78,82                   | 5723                       | 2,1   | 73  |
| <b>Porto Santo</b>     | 42,48                   | 5483                       | 2,0   | 129   |
| <b>Ilha da Madeira</b> | 741,79                  | 262302                     | 98,0  | 354   |
| <b>R.A.M.</b>          | 784,27                  | 267785                     | 100,0 | 341   |

Fonte: INE, 2011

Em termos de grupos etários, a maior percentagem de indivíduos, pertence à classe ativa da população (25 – 64 anos), com 56%, seguida da classe (0 – 14 anos) com 17%. A população com mais de 65 anos representa 15%, e com 12% a população cujas idades estão compreendidas entre os 15 e 24 anos.



## CAPÍTULO 2. INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA: AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO

### 2.1. A AQUISIÇÃO DE INFORMAÇÃO E CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS

Para a realização do presente trabalho foi necessária a aquisição de informação de base com diferentes origens, tipos e estruturas de dados (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 - Síntese da Informação de Base utilizada no trabalho.

| Informação de base                          | Proprietário    | Escala ou Resolução | Temas criados   |
|---|-----------------|---------------------|---|
| Ortofotos da RAM, (2007 e 2010)             | DROTA           | 0,3 m               | Áreas deslizadas  |
| Cartografia Topográfica da Ilha da Madeira  | DROTA           | 1/5 000             | Altitude, Declives, Exposição e Curvatura das vertentes |
| Carta de Ocupação do Solo (COS2007 nível 2) | DROTA           | 1/25 000            | Classes de Ocupação do Solo                             |
| Carta Geológica da Ilha da Madeira          | SRARN           | 1/50 000            | Classes litológicas                                     |
| Carta dos Solos da Madeira                  | G.R M; SRA; DRA | 1/50 000            | Tipos de Solos  |

A construção de uma base de dados é uma etapa importante, na medida em que assegura as funções de entrada e de registo de informação, correção, supressão, extração de dados e a organização do acesso à informação.

A base de dados foi criada com recurso ao *software* SIG ArcGIS 10.1, sendo que a identificação dos ficheiros a utilizar e posterior conversão, para um dos formatos nativos do programa, no caso (*shapefile*, *grid* e *dbase*), foi uma preocupação, de modo a evitar um eventual surgimento de conflitos numa fase mais adiantada do trabalho.

Foi igualmente atribuído um sistema de referenciação (projeção Universal Transversa de Mercator UTM, Zona 28N, elipsoide Internacional e *datum* de Porto Santo 1936) comum a todos os temas, bem como ao projeto SIG, de modo a garantir a exata sobreposição.

A unidade de terreno definida no processo de computação foi uma célula de 10×10m (100 m<sup>2</sup>), considerada adequada, tendo em conta a área de estudo, a escala de trabalho e os objetivos pretendidos.

De modo a que toda a informação pudesse ser integrada e trabalhada num SIG, foi necessário assegurar que esta se encontrasse em formato digital.

Neste contexto, a carta geológica e carta dos solos, por se encontrarem em formato analógico (papel), foram sujeitas a algumas tarefas preparatórias:

- i. Digitalização das folhas;
- ii. Georreferenciação e atribuição de um sistema de coordenadas;
- iii. Vectorização das formações geológicas e dos solos (polígonos);
- iv. Criação da topologia;
- v. Criação de uma base de dados alfanumérica com os atributos necessários;
- vi. Conversão para estrutura matricial.

Quanto às variáveis espaciais declive, exposições e curvatura das vertentes, derivaram diretamente do Modelo Numérico de Elevação (MNE), elaborado pela Município EM, SA. Derivado de uma rede irregular de triângulos (TIN – Triangular Irregular Network), obtida através de informação linear e pontual - curvas de nível (com equidistância de 5 m), rede hidrográfica, linhas de rotura e pontos cotados, presentes na cartografia topográfica da ilha da Madeira à escala 1:5000, facultada pela DROTA.

## **2.2.PROCESSO DE CRIAÇÃO DA CARTOGRAFIA DOS DESLIZAMENTOS**

### **2.2.1. Inventariação dos Deslizamentos**

A inventariação dos deslizamentos é uma etapa indispensável na análise da suscetibilidade, perigosidade ou risco de movimentos de vertente, sem a qual o recurso a métodos indiretos de avaliação não seria possível.

O processo de inventariação e cartografia dos deslizamentos para os concelhos da Calheta, Câmara de Lobos, Funchal, Machico, Ponta do Sol e Santa Cruz, foi obtido com recurso a cartografia, apoiada sobre ortofotos à escala 1:5000 para os anos de 2007 e 2010 (resolução de 0,3 m) da DROTA. Foram também utilizadas curvas de nível com equidistância de 5 m de modo a facilitar a interpretação dos ortofotos, nomeadamente na melhor identificação dos topos e bases das vertentes (ajuda na confirmação de cicatrizes de deslizamentos), a inclinação e o desnível das mesmas e ainda o sentido do fluxo da massa deslizada.

Foi criado um tema de polígonos onde foram delimitadas, através de vetorização, as áreas deslizadas segundo os critérios seguidos por Almeida (2013):

- a) Cicatriz com aspeto mais ou menos fresco, por isso mais evidente;
- b) Interrupção abrupta da vegetação, essencialmente em áreas de vegetação densa;
- c) Diferença de coloração da superfície, indicando possível deslocação de material.

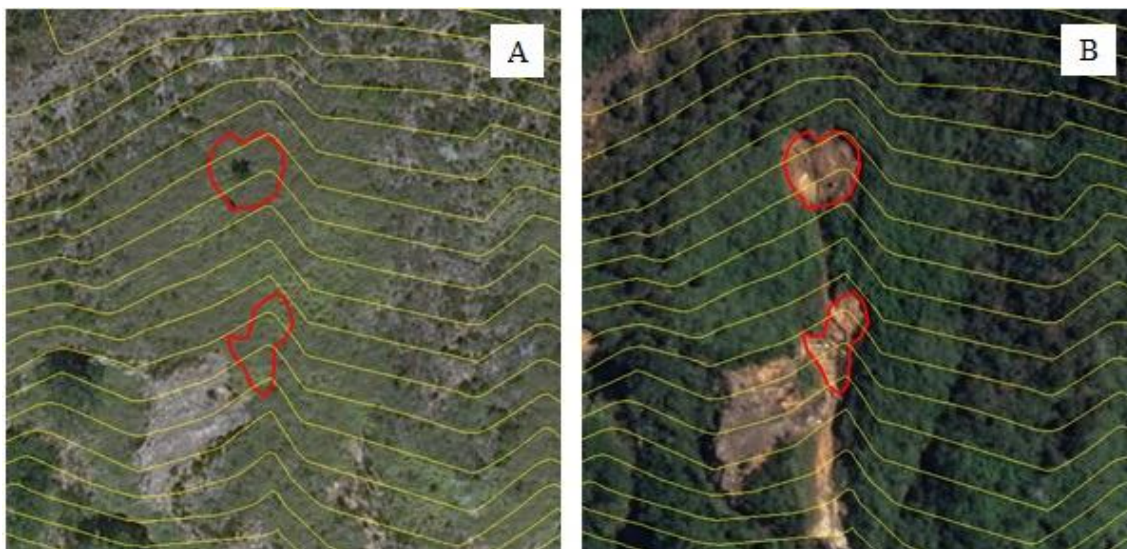


Figura 2-1 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de Ribeira Brava: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010

O recurso a ortofotos com datas diferentes – 2007 e 2010 – permitiu confrontar as áreas onde ocorreram deslizamentos nesse período de tempo, o que se revelou fundamental, visto que a maior parte das ocorrências encontram-se apenas na informação de 2010.

Tendo em conta que o trabalho é realizado numa escala regional cuja resolução de trabalho são células de 10×10m, apenas foram considerados deslizamentos com dimensão superior a 100 m<sup>2</sup>, sendo que a utilização de uma área inferior, aquando da conversão para matricial não seria representada ou estaria sobrevalorizada. Além do mais, deslizamentos inferiores a esta dimensão não são considerados relevantes à escala regional, visto que parecem ter impactos reduzidos sobre as áreas afetadas, a que se pode acrescentar o facto de a sua validação ser mais difícil.

Mantendo os mesmos critérios de dimensão, utilizaram-se os deslizamentos inventariados em (Almeida, 2013) para os concelhos de Porto Moniz, Ribeira Brava, São Vicente e Santana.



Importa referir que o método de inventariação aqui utilizado não permite, de forma clara e inequívoca, identificar qual o tipo de deslizamento em presença (rotacional ou translacional), o que permitiria análises separadas. Este tipo de diferenciação, bem como a validação dos deslizamentos, que poderia ser obtida através de trabalho de campo complementar, não foi de todo possível realizar, quer por questões logísticas quer mesmo por inacessibilidade a certos locais.

Assim, neste contexto, foram utilizados 281 deslizamentos de Almeida (2013) e inventariados 745, perfazendo um total de 1026 deslizamentos (Figura 2-2).

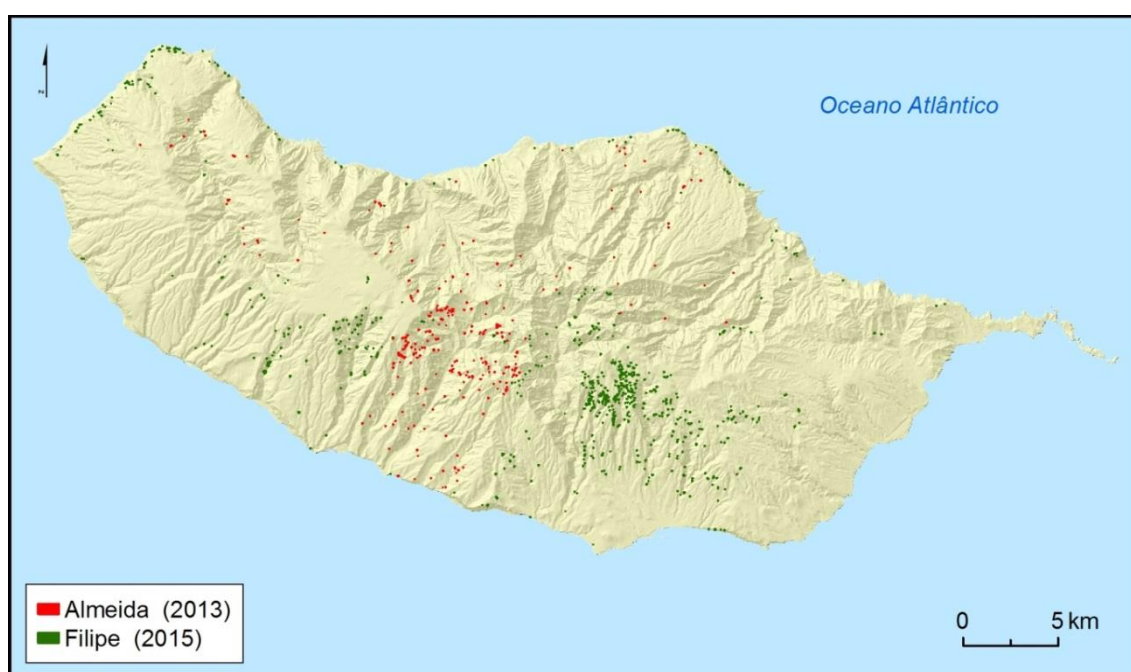


Figura 2-2 - Deslizamentos inventariados por fotointerpretação (ortofotos de 2007 e de 2010) na ilha da Madeira.

### 2.2.2. Partição da área de estudo

Por se considerar que os deslizamentos na faixa costeira e os deslizamentos nas áreas do interior da ilha ocorrem em contextos geomorfológicos distintos, resolveu-se avançar com a análise de três áreas diferentes (Figura 2-3): uma área correspondente à totalidade da ilha da Madeira (Área I); outra correspondente a uma faixa costeira, considerando como limite interior a crista da arriba e/ou vertente com frente para o mar (algumas áreas não foram representadas devido à inexistência de arribas, como por exemplo

desembocaduras de algumas ribeiras e ainda a zona baixa do Funchal) (Área II); e outra com a restante área do interior da ilha (Área III).



Figura 2-3 - Limites das áreas de análise consideradas no estudo.

A partição das diferentes áreas de estudo foi efetuada com recurso a ortofotos e a curvas de nível com equidistância de 5 m (Figura 2-4).

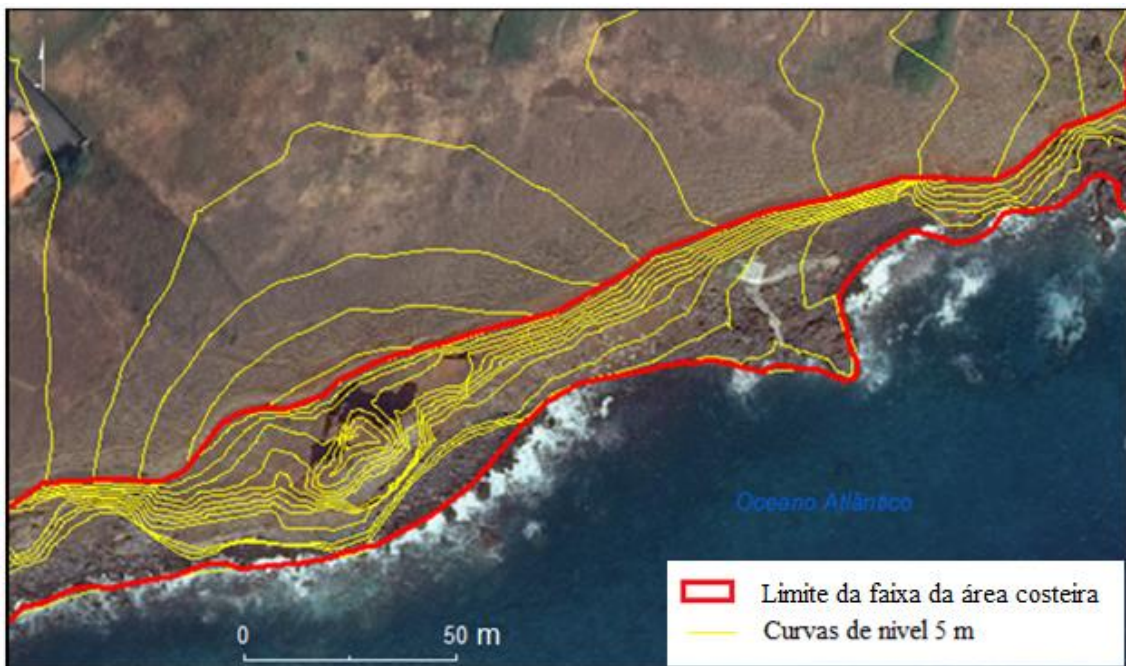


Figura 2-4 - Exemplo da identificação dos limites da área da faixa costeira (troço situado na localidade de Portinho, a este da Ponta da Atalaia). Bases cartográficas e fontes: ortofotos (DROTA, 2010); curvas de nível (DROTA, 2007).

### 2.2.3. Características dos deslizamentos inventariados

Como referido no ponto 2.2.1, foram inventariados 1026 deslizamentos, o que equivale a uma densidade de cerca de 1,39 deslizamentos/km<sup>2</sup>. Os deslizamentos cobrem 349500 m<sup>2</sup> (0,05 % da área total), com dimensões que variam entre 100,03 m<sup>2</sup> e 19566 m<sup>2</sup>, sendo a média por deslizamento de 339 m<sup>2</sup>.

Quadro 2.2 - Características do inventário de deslizamentos na área de estudo.

| Nº de deslizamentos | Área total (m <sup>2</sup> ) | % da área de estudo | Área (m <sup>2</sup> ) dos deslizamentos |       |       |               |
|---------------------|------------------------------|---------------------|--|-------|-------|---------------|
|                     |                              |                     | Mín.                                     | Máx.  | Média | Desvio Padrão |
| 1026                | 349500                       | 0,05                | 100,03                                   | 19566 | 339   | 818,4         |

Neste estudo, foi efetuada uma partição dos deslizamentos inventariados baseada na dimensão de cada um. Esta partição tem como objetivo fazer correr o modelo de suscetibilidade com cada grupo de deslizamentos separadamente, a fim de avaliar até que ponto a dimensão dos deslizamentos influencia os resultados, quer na taxa de sucesso quer na taxa de predição.

Neste contexto, foram criados três grupos de deslizamentos: um com áreas superiores a 100 m<sup>2</sup>, ou seja, com a totalidade dos deslizamentos (Grupo I); outro cuja dimensão de cada área deslizada seja superior a 500 m<sup>2</sup> (Grupo II); e outro em que a área deslizada seja superior a 1000 m<sup>2</sup> (Grupo III).

Assim, o Grupo I corresponde à área de estudo cujas características dos deslizamentos já foram descritas anteriormente no Quadro 2.2. O Grupo II contém 138 deslizamentos, correspondendo a 163700 m<sup>2</sup> de área deslizada, enquanto o Grupo III contém 39 deslizamentos, que correspondem a 96800 m<sup>2</sup> de área deslizada.

Analisando o Quadro 2.3, que tem em conta os três grupos de deslizamentos ocorridos na totalidade da ilha, verifica-se que a grande maioria da área deslizada referente ao Grupo I encontra-se distribuída por três concelhos: Funchal, com 36,3 % da área deslizada; Ponta do Sol, com 17,3 %; e Ribeira Brava, com 15,7 %.

Quanto aos deslizamentos do Grupo II, o concelho de Ponta do Sol é o que apresenta maior área deslizada, com 31,5 % do total, seguido do Funchal, com 31,1 %, e de Ribeira Brava, com 12,7 %.

Já no que se refere aos deslizamentos com áreas superiores a 1000 m<sup>2</sup> (Grupo III), Ponta do Sol é o concelho com maior percentagem de área deslizada, com 46,5 %, seguindo-se o Funchal com 25,1 % e Câmara de Lobos com 9,5 %.

Quadro 2.3 - Fração (%) de área deslizada por concelho em relação ao total de área deslizada de cada grupo de deslizamentos, para a totalidade da ilha da Madeira.

| Concelho               | Área deslizada (%) (Área Total)   |                                    |                                      |
|------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
|                        | Grupo I<br>(>100 m <sup>2</sup> ) | Grupo II<br>(>500 m <sup>2</sup> ) | Grupo III<br>(>1000 m <sup>2</sup> ) |
| <b>Calheta</b>         | 4,5                               | 3,5                                | 3,6                                  |
| <b>Câmara de Lobos</b> | 8,4                               | 8,8                                | 9,5                                  |
| <b>Funchal</b>         | 36,3                              | 31,1                               | 25,1                                 |
| <b>Machico</b>         | 1,9                               | 2,4                                | 1,9                                  |
| <b>Ponta do Sol</b>    | 17,3                              | 31,5                               | 46,5                                 |
| <b>Porto Moniz</b>     | 7,2                               | 5,1                                | 3,4                                  |
| <b>Ribeira Brava</b>   | 15,7                              | 12,7                               | 7,0                                  |
| <b>Santa Cruz</b>      | 3,1                               | 3,7                                | 3,0                                  |
| <b>Santana</b>         | 3,0                               | 0,8                                | 0,0                                  |
| <b>São Vicente</b>     | 2,5                               | 0,4                                | 0,0                                  |

Quanto aos deslizamentos ocorridos somente no interior da ilha (área total da ilha menos a faixa costeira), verifica-se que a grande maioria da área deslizada encontra-se distribuída igualmente pelos concelhos do Funchal, Ponta do Sol e Ribeira Brava. O Funchal é o concelho com maior percentagem de área deslizada, 39,1 % no que se refere aos deslizamentos com áreas superiores a 100 m<sup>2</sup>, seguido de Ponta do Sol com 18,6 % e Ribeira Brava com 17,4 %. Quanto aos deslizamentos cujas áreas são superiores a 500 m<sup>2</sup>, o concelho de Ponta do Sol é o que apresenta maior área deslizada, 33,2 %, seguido do Funchal com 32 % e Ribeira Brava com 13,4 %. No que concerne aos deslizamentos com áreas superiores a 1000 m<sup>2</sup>, Ponta do Sol, é o concelho com maior percentagem de área deslizada 48,9 %, o Funchal contém 26,3 % de área deslizada e Câmara de Lobos 8,7 %.

Quadro 2.4 - Frequência relativa de área deslizada, por grupo de deslizamentos tendo como limite o interior da ilha.

| (%) Área deslizada (Interior) |                     |                     |                      |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Concelho                      | >100 m <sup>2</sup> | >500 m <sup>2</sup> | >1000 m <sup>2</sup> |
| Calheta                       | 3,1                 | 1,4                 | 0,0                  |
| Câmara de Lobos               | 8,2                 | 8,2                 | 8,7                  |
| Funchal                       | 39,1                | 32,0                | 26,3                 |
| Machico                       | 1,8                 | 2,6                 | 2,0                  |
| Ponta do Sol                  | 18,6                | 33,2                | 48,9                 |
| Porto Moniz                   | 4,1                 | 3,9                 | 3,6                  |
| Ribeira Brava                 | 17,4                | 13,4                | 7,3                  |
| Santa Cruz                    | 3,4                 | 3,9                 | 3,2                  |
| Santana                       | 2,2                 | 1,1                 | 0,0                  |
| São Vicente                   | 2,3                 | 0,4                 | 0,0                  |

Quanto aos deslizamentos ocorridos na faixa costeira, o Grupo I regista uma maior percentagem de área deslizada, 46,7 % no concelho de Porto Moniz seguido da Calheta com 17,4 % de área deslizada e de Santana com 16,3 % Quanto aos deslizamentos cujas áreas são superiores a 500 m<sup>2</sup> (Grupo II), o concelho da Calheta é o que apresenta maior área deslizada, 42%, seguido de Porto Moniz com 27,4 % e Funchal com 16,1 %. No que concerne aos deslizamentos com áreas superiores a 1000 m<sup>2</sup> (Grupo III), estes apenas se encontram no concelho da Calheta com 74,3 % de área deslizada e de Câmara de Lobos com 25,7 % (Quadro 2.5).

Quadro 2.5 - Frequência relativa de área deslizada, por grupo de deslizamentos, tendo em conta o limite da faixa costeira.

| (%) Área deslizada (Faixa costeira) |                     |                     |                      |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Concelho                            | >100 m <sup>2</sup> | >500 m <sup>2</sup> | >1000 m <sup>2</sup> |
| Calheta                             | 17,4                | 42,0                | 74,3                 |
| Câmara de Lobos                     | 6,7                 | 14,5                | 25,7                 |
| Funchal                             | 5,5                 | 16,1                | 0,0                  |
| Machico                             | 1,1                 | 0,0                 | 0,0                  |
| Ponta do Sol                        | 0,0                 | 0,0                 | 0,0                  |
| Porto Moniz                         | 46,7                | 27,4                | 0,0                  |
| Ribeira Brava                       | 0,8                 | 0,0                 | 0,0                  |
| Santa Cruz                          | 0,0                 | 0,0                 | 0,0                  |
| Santana                             | 16,3                | 0,0                 | 0,0                  |
| São Vicente                         | 5,5                 | 0,0                 | 0,0                  |

## CAPÍTULO 3. MOVIMENTOS DE VERTENTE: CARATERÍSTICAS E FATORES CONDICIONANTES

### 3.1.OS MOVIMENTOS DE VERTENTE

#### 3.1.1. Conceitos Gerais

Os movimentos de vertente são consequência de duas forças antagónicas, em que num sentido se encontram as forças tangenciais que promovem a movimentação dos materiais segundo a gravidade e, em sentido oposto, se encontram as forças de atrito que contrariam o movimento promovendo a coesão dos materiais (Bateira, 2001).

Para que haja movimentos de vertente, é necessário que as forças tangenciais superem as forças de atrito. Neste contexto, o declive é um fator condicionante com especial relevância para a ocorrência de movimentos de vertente, pois quanto mais acentuado for o declive maior será a influência da força de gravidade sobre os materiais existentes nas vertentes (Teixeira, 2005).

Segundo Hutchinson (1968, p. 688) *in* Zêzere (1997), “os movimentos de massa compreendem todos os movimentos induzidos pela gravidade, com exclusão daqueles em que o material é mobilizado por um agente de transporte...”. Um movimento de vertente, segundo Cruden (1991) *in* Teixeira, 2005), é um “movimento de descida, numa vertente, de uma massa de rocha, terra ou detritos”.

O grupo de trabalho da UNESCO, denominado por Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI, 1993), distingue e classifica cinco tipos de movimentos de vertente:

- **Desabamentos:** queda livre de rochas ou solos de uma vertente, talude ou escarpa, em que a superfície de deslizamento está ausente ou é muito reduzida; este tipo de movimento pode consequentemente levar a fenómenos de salto e/ou rolamento dos materiais de queda;
- **Tombamento:** rotação de massas de rocha a partir de um ponto situado abaixo do centro de gravidades da massa afetada;
- **Deslizamentos:** movimento numa vertente ou talude de solo ou rocha ao longo de uma superfície de rotura, com efeitos de intensa deformação tangencial;

- **Expansão lateral:** extensão de terrenos coesivos, solo ou rocha, combinada com subsidência geral;
- **Escoadas:** movimentos espacialmente contínuos onde as superfícies de tensão tangencial são efémeras e raramente preservadas; a morfologia da massa deslocada assemelha-se a um fluido viscoso.

No caso dos deslizamentos, que correspondem aos movimentos de massa em vertente tratados neste trabalho, o material deslocado durante o movimento pode apresentar diferentes graus de deformações consoante se trata de deslizamentos do tipo rotacional ou do tipo translacional. Deslizamentos rotacionais: ocorrem ao longo de superfícies de rutura curvas, em meios geralmente homogêneos e isotrópicos com forma côncava, afetando tendencialmente terrenos homogêneos e isotrópicos (Sirieys, 1984 *in* Zêzere 1997). Devido ao plano de rutura ser côncavo, implica que haja uma rotação, que implica um abatimento a montante e um depósito de material no setor frontal, formando aclives mais ou menos pronunciados (Záruba e Mencl, 1982; Hutchinson, 1988 *in* Zêzere 1997).

Por sua vez, os deslizamentos translacionais, podem ser com plano de rutura compósito, ou com plano de rutura planar. No primeiro caso, os deslizamentos ocorrem segundo um plano de rutura com duas secções, sendo uma de forma circular ou planar com forte inclinação a montante, e outra de forma planar com fraca inclinação a jusante.

Os deslizamentos translacionais com plano de rutura planar são controlados estruturalmente, onde o plano de rutura progride ao longo de superfícies de fraqueza marcadas por uma fraca resistência ao corte, como falhas, planos de estratificação, diáclases, ou o contacto entre uma cobertura detrítica e o substrato rochoso (Zêzere, 2005).

Quadro 3.1 - Classificação dos deslizamentos proposta por DIKAU *et al.* 1996, in Zêzere (1997).

| Tipos de deslizamentos |                      | Tipo de material               |                                   |                               |
|------------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|                        |                      | Rocha                          | Detritos                          | Terra                         |
| Rotacionais            |                      | Simples                        | Simples                           | Simples                       |
|                        |                      | Múltiplo                       | Múltiplo                          | Múltiplo                      |
|                        |                      | Sucessivo                      | Sucessivo                         | Sucessivo                     |
| Translacionais         | Com rutura compósita | Deslizamento de rocha em bloco | Deslizamento de detritos em bloco | Deslizamento de solo em bloco |
|                        | Com rutura planar    | Deslizamento de rocha          | Deslizamento de detritos          | Deslizamento de solo          |

Fonte: Adaptado de Zêzere (1997)

### 3.2.FATORES CONDICIONANTES E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DESLIZAMENTOS

#### 3.2.1. Declives

Tal como referido anteriormente, o declive é derivado do MNE e expresso numa gama de valores contínuos, havendo por isso necessidade de classificá-lo, mas mantendo a sua representatividade em relação ao fenómeno estudado.

De acordo com Garcia (2012), quanto menor for a amplitude das classes, melhor é o grau de ajuste do modelo, pelo que considerar classes com uma amplitude de 1° de declive seria preferível a amplitudes maiores. Contudo, seguindo este critério obtém-se um número demasiado elevado de classes e elevada redundância entre elas.

Assim, com o objetivo de diminuir o número de classes sem que o parâmetro perca muita da sua capacidade preditiva, foi realizada uma análise cruzando este parâmetro, classificado com amplitudes de 1°, com as áreas deslizadas, com o intuito de verificar como estas se distribuem pelas classes e paralelamente verificar a probabilidade condicionada de ocorrência do fenómeno em cada uma das classes.

A Figura 3-1 mostra a distribuição espacial das diversas classes de declive pela ilha da Madeira, onde se pode observar que as áreas mais declivosas dizem respeito às vertentes dos vales mais encaixados em torno do Pico do Areeiro e do planalto do Paul da Serra. As áreas mais aplanadas localizam-se no planalto do Paul da Serra, no setor



sudeste da ilha, incluindo a região do Funchal, e no extremo noroeste do concelho de Porto Moniz.



Figura 3-1 - Distribuição espacial das classes de declive (em graus), na ilha da Madeira.

Analisando os resultados, verifica-se que nas classes com inclinações inferiores a 5°, praticamente não foram registados deslizamentos, ou seja, apenas cerca de 0,1% do total da área deslizada e cuja probabilidade condicionada pode ser considerada quase nula (Figura 3-2).

A classe onde a área deslizada é maior está compreendida entre os declives 30° e 40°. As elevadas probabilidades condicionadas registadas nas classes com declives superiores a 75°, deve-se ao facto destas classes, mesmo em conjunto, terem uma dimensão reduzida, cerca de 0,004% do total da área de estudo, onde a ocorrência de qualquer deslizamento, mesmo pequeno que seja, vai ser sobrevalorizado.

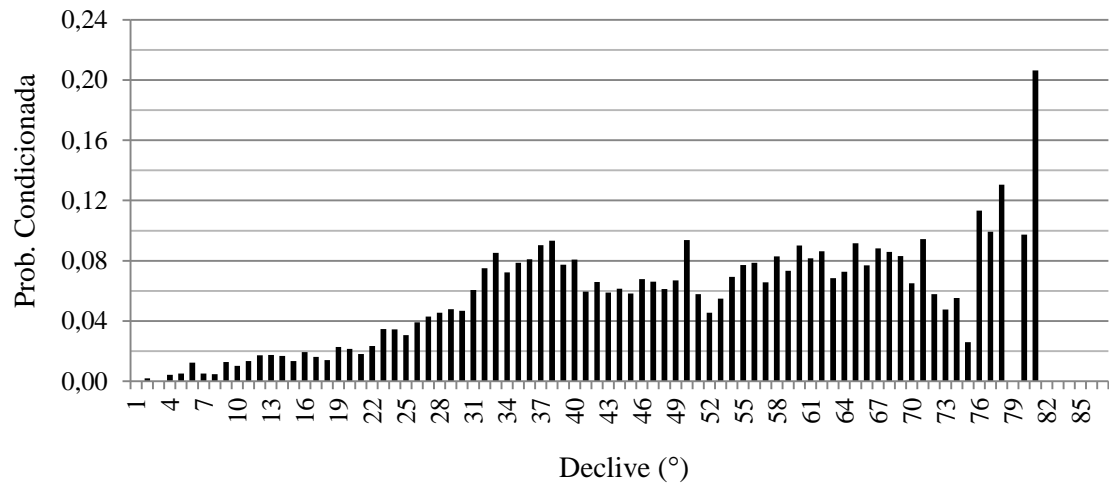


Figura 3-2 - Probabilidade condicionada (x100) por classe de declive (classificada com amplitudes de 1°).

Em resultado da análise realizada, optou-se pela classificação em oito classes com amplitude de 5° para os declives compreendidos entre 0 e 40°, duas classes com amplitude de 10° para os declives compreendidos entre 40 e 60° e uma classe agregadora com os valores de declive > 60°, perfazendo um total de onze classes.

Tal como se pode verificar no Quadro 3.2, resultante do cruzamento do mapa de declives classificados com as áreas deslizadas, a área deslizada vai aumentando de forma aproximadamente exponencial à medida que o declive aumenta, até 30° - 35° de inclinação. Entre 30° e 50° é onde se encontra a maioria da área deslizada (58,3 %). A partir de 50°, as áreas deslizadas diminuem acentuadamente à medida que o declive aumenta.

Quadro 3.2 - Frequência das classes de declive (ha e %) e fração (ha e %) do total da área deslizada em cada classe de declive.

| Código     | Classes de declive (°) | Área da classe |      | Área deslizada |      |
|------------|------------------------|----------------|------|----------------|------|
|            |                        | (ha)           | (%)  | (ha)           | (%)  |
| <b>D1</b>  | [0 - 5]                | 3026           | 4,1  | 0,09           | 0,3  |
| <b>D2</b>  | ]5 - 10]               | 5457           | 7,4  | 0,5            | 1,4  |
| <b>D3</b>  | ]10 - 15]              | 7204           | 9,7  | 1,1            | 3,1  |
| <b>D4</b>  | ]15 - 20]              | 7528           | 10,1 | 1,42           | 4,1  |
| <b>D5</b>  | ]20 - 25]              | 7617           | 10,3 | 2,25           | 6,4  |
| <b>D6</b>  | ]25 - 30]              | 8145           | 11,0 | 3,73           | 10,7 |
| <b>D7</b>  | ]30 - 35]              | 8897           | 12,0 | 6,68           | 19,1 |
| <b>D8</b>  | ]35 - 40]              | 8405           | 11,3 | 6,98           | 20,0 |
| <b>D9</b>  | ]40 - 50]              | 10244          | 13,8 | 6,72           | 19,2 |
| <b>D10</b> | ]50 - 60]              | 4722           | 6,4  | 3,23           | 9,2  |
| <b>D11</b> | > 60                   | 2920           | 3,9  | 2,25           | 6,4  |

No que respeita à probabilidade de se encontrar área deslizada em cada classe de declive, a Figura 3-3, mostra que a probabilidade condicionada vai aumentando à medida que aumenta o declive até à classe [35 - 40], diminuindo na classe seguinte, não porque a área deslizada diminuiu, mas porque a área da classe aumentou, voltando a aumentar até à classe mais declivosa, aqui devido à diminuição da área da classe.

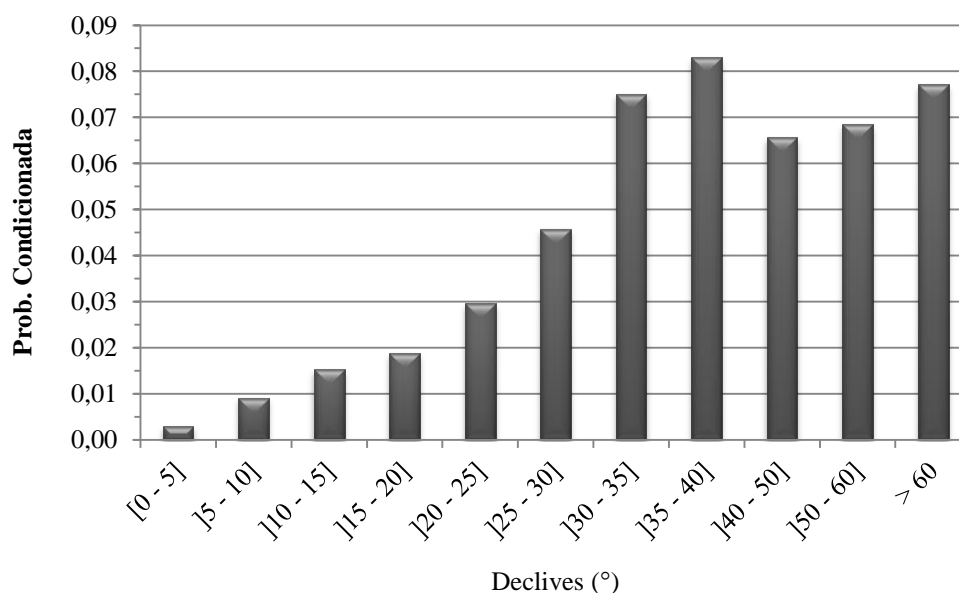


Figura 3-3 – Probabilidade condicionada (x100) por classe de declive

### 3.2.2. Exposição das Vertentes

A exposição é outra condicionante que pode influenciar os movimentos de vertente, pela sua correlação com fatores climáticos (Clerici *et al.*, 2006; Clerici *et al.*, 2010), estruturais (Reis *et al.*, 2003; Zêzere *et al.*, 2008) e/ou geomorfológicos (Teixeira, 2005). A exposição ao sol e aos ventos, afeta indiretamente fatores que contribuem para os deslizamentos de terra, tais como precipitação, humidade do solo, cobertura vegetal e espessura do solo (Clerici *et al.*, 2006).

A Figura 3-4 mostra a exposição das vertentes pela ilha da Madeira, onde se pode observar claramente, que existe uma divisão praticamente simétrica no sentido longitudinal entre os setores norte e sul da ilha.

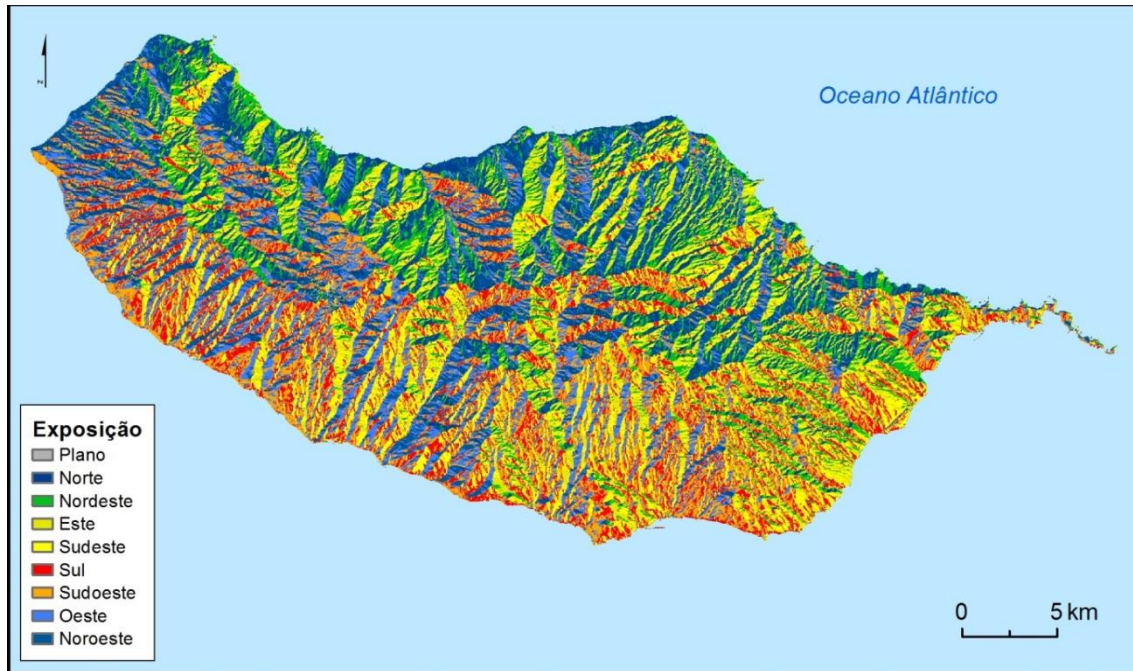


Figura 3-4 - Exposições das vertentes da ilha da Madeira.

A classificação desta condicionante teve por base os pontos cardiais e colaterais, em setores com  $45^\circ$  de amplitude, sendo os pontos subcolaterais os limites das classes, originando deste modo 8 classes de exposição. Foi ainda criada mais uma classe de modo a integrar os valores (-1) correspondentes às áreas topograficamente horizontais, ou sem orientação definida.

No Quadro 3.3 verifica-se que na ilha da Madeira as exposições das vertentes encontram-se distribuídas quase uniformemente pelos 8 setores, sendo os N e NE, com 10,9 % e 11,2 % respetivamente, os que apresentam menor área. Em oposição, o setor SE, com 14,3 %, é o que ocupa maior área. As áreas topograficamente horizontais, ou sem orientação definida ocupam 43,3 hectares, não tendo por isso praticamente representatividade em termos percentuais face à área total da ilha.

Quadro 3.3 - Frequência das classes de exposição (ha e %) e fração (ha e %) do total da área deslizada em cada classe de exposição

| Código | Classes  | Área da classe |      | Área deslizada |      |
|--------|----------|----------------|------|----------------|------|
|        |          | (ha)           | (%)  | (ha)           | (%)  |
| EV1    | Plano    | 43,3           | 0,06 | 0              | 0    |
| EV2    | Norte    | 8107,8         | 10,9 | 2,3            | 6,2  |
| EV3    | Nordeste | 8329,2         | 11,2 | 2,4            | 6,7  |
| EV4    | Este     | 8881,6         | 12,0 | 3,5            | 11,1 |
| EV5    | Sudeste  | 10573,9        | 14,3 | 7,5            | 20,4 |
| EV6    | Sul      | 10061,2        | 13,6 | 5,7            | 17,7 |
| EV7    | Sudoeste | 9847,0         | 13,3 | 6,5            | 17,8 |
| EV8    | Oeste    | 9567,3         | 12,9 | 5              | 14,0 |
| EV9    | Noroeste | 8754,1         | 11,8 | 2,1            | 6,1  |

Através do cruzamento dos deslizamentos com as classes de exposição de vertentes, verifica-se que as vertentes de NO a NE são as que registam uma menor área deslizada, com 18,9 % no conjunto dos 3 setores; o setor SE a SO é aquele onde a área deslizada é maior, representando 55,9 % do total da área deslizada. Na sequência desse cruzamento, aferiu-se também a probabilidade condicionada de ocorrência do fenómeno em cada classe de exposição (Figura 3-5): as vertentes com exposição SE - SO são aquelas onde a probabilidade condicionada é maior; em sentido contrário, está o setor NE – NO, onde essa probabilidade é menor.

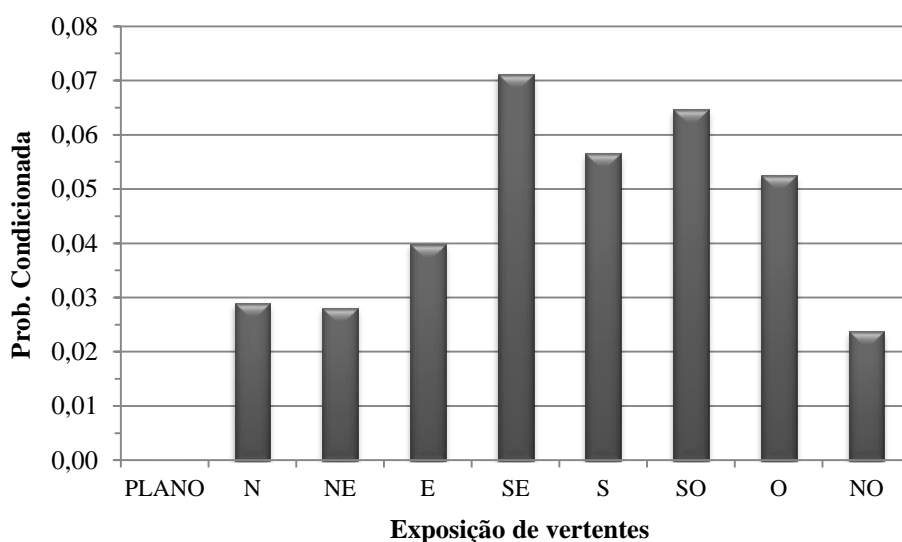


Figura 3-5 – Probabilidade condicionada (x100) por classe de exposição de vertentes

No caso da probabilidade condicionada para este fator, deve ser considerada a possibilidade dos valores poderem estar afetados por diferenças de inventariação dos deslizamentos. De facto, alguns setores das vertentes não permitiram a identificação de ocorrências, visto que correspondiam a áreas de sombra nos ortofotos.

### 3.2.1. Índice Topográfico de Humidade

O teor de humidade no solo é um parâmetro que tem influência na coesão dos materiais, logo nos movimentos de vertente. O Índice Topográfico de Humidade (ITH), que se traduz no grau de acumulação de água superficial ou subterrânea, é frequentemente parametrizado por estimativas na área de captação.

O cálculo do ITH foi efetuado com recurso ao *software SAGA 2.1.0*, cujo algoritmo próprio combina o declive de cada célula com a área acumulada que drena para essa mesma célula.

O resultado foi um mapa (Figura 3-6) representativo do teor potencial de água no solo, numa escala de valores contínuos compreendidos entre  $-0,15$  (- humidade) e  $10,85$  (+ humidade), sendo, por isso, necessária a sua classificação.

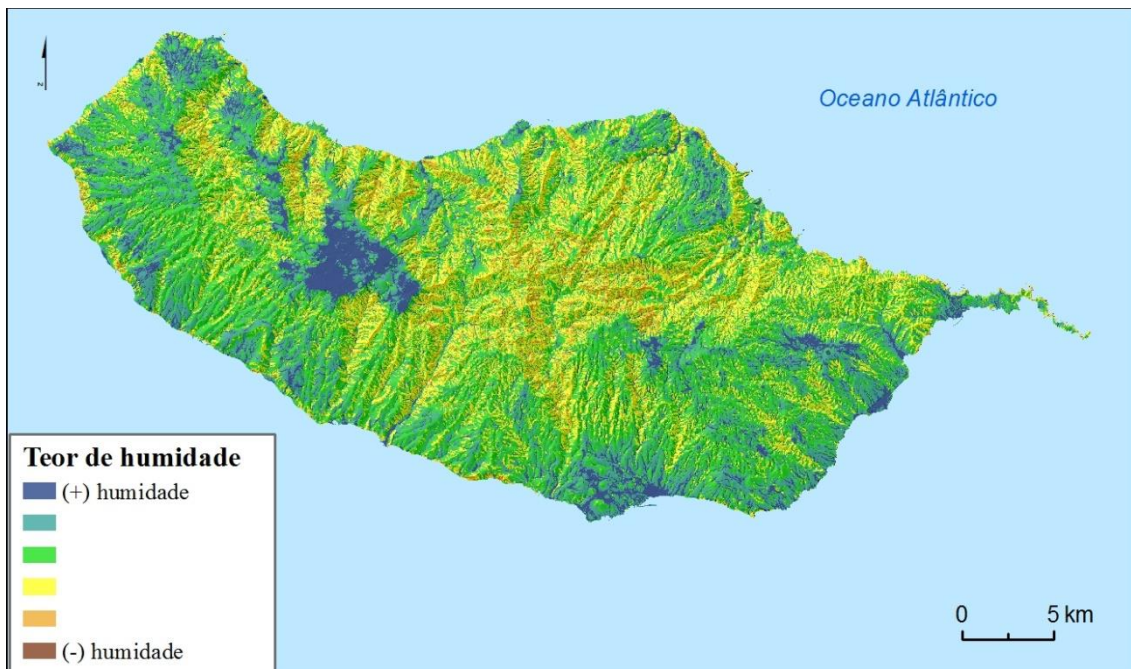


Figura 3-6 - Distribuição do Índice Topográfico de Humidade (ITH) na ilha da Madeira

Neste contexto, procedeu-se à classificação dos valores em 6 classes de humidade, discriminadas no Quadro 3.4, onde uma classe compreende todos os valores negativos e as restantes 5, os valores positivos, com amplitudes de 2 valores, sendo a classe mais elevada com amplitude de 2,85.

Cruzando as áreas deslizadas com as classes do ITH verifica-se que a maioria da área deslizada (96 %) encontra-se nas classes 3, 4 e 5, que são, também, aquelas que cobrem grande parte da área de estudo (88 %).

Quadro 3.4 - Frequência das classes de ITH (ha e %) e fração (%) do total da área deslizada em cada classe de ITH

| Intervalo da classe | Classes | ITH      | Área da classe |      | Área deslizada |      |
|---------------------|---------|----------|----------------|------|----------------|------|
|                     |         |          | (ha)           | (%)  | (ha)           | (%)  |
| [-0,15 - 0]         | ITH 6   | (+)      | 6327,9         | 8,5  | 0,8            | 2,3  |
| ]0 - 2]             | ITH 5   | Humidade | 13597,0        | 18,3 | 5,1            | 14,5 |
| ]2 - 4]             | ITH 4   |          | 29874,2        | 40,3 | 16,7           | 47,7 |
| ]4 - 6]             | ITH 3   |          | 22135,6        | 29,8 | 11,6           | 33,2 |
| ]6 - 8]             | ITH 2   |          | 2208,3         | 3,0  | 0,8            | 2,3  |
| ]8 - 10,85]         | ITH 1   | (-)      | 22,4           | 0,0  | 0,0            | 0,0  |

Ao analisar-se a Figura 3-7, que indica os valores relativos à probabilidade condicionada de se encontrar área deslizada em cada classe de ITH, verifica-se que as classes intermédias são as que maiores valores registam. A classe que retém menos humidade, localizada quase na totalidade em áreas com declives superiores a 60° (Quadro 3.5), regista igualmente um valor acentuado. Já as áreas mais húmidas correspondem aos fundos de vale e a áreas de fraco declive, apresentando por esse facto uma probabilidade condicionada baixa.

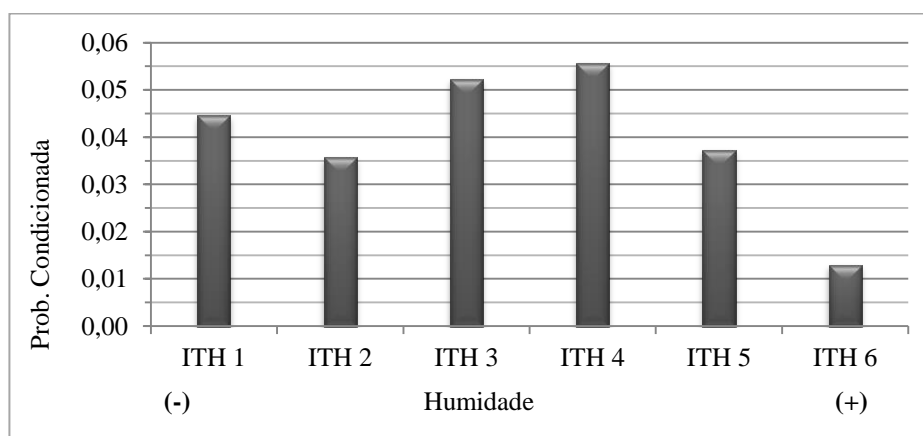


Figura 3-7 - Probabilidade condicionada (x100) por classe de (ITH).

Ao relacionar-se o ITH com as classes de declive, verifica-se que a humidade no solo vai aumentando à medida que o declive diminui (Quadro 3.5), em que 77 % da área da classe onde a humidade do solo é mais elevada encontra-se em declives inferiores a 15°, enquanto 95 % da área da classe ITH 2 encontra-se em declives superiores a 40°. Já 94 % da área da classe mais seca, encontra-se em declives superiores a 60°.

Quadro 3.5 - Frequência relativa (%) da área de cada classe de (ITH) por classe de declive.

| Classes de declive (°) | Humidade |       |       |       |       |       |
|------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | (+)      |       |       |       |       | (-)   |
|                        | ITH 6    | ITH 5 | ITH 4 | ITH 3 | ITH 2 | ITH 1 |
| [0 - 5]                | 37       | 5     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| ]5 - 10]               | 25       | 22    | 3     | 0     | 0     | 0     |
| ]10 - 15]              | 15       | 25    | 9     | 1     | 0     | 0     |
| ]15 - 20]              | 9        | 17    | 14    | 2     | 0     | 0     |
| ]20 - 25]              | 5        | 10    | 16    | 5     | 0     | 0     |
| ]25 - 30]              | 3        | 7     | 16    | 10    | 0     | 0     |
| ]30 - 35]              | 2        | 5     | 15    | 15    | 1     | 0     |
| ]35 - 40]              | 1        | 4     | 12    | 19    | 3     | 0     |
| ]40 - 50]              | 1        | 4     | 10    | 28    | 18    | 1     |
| ]50 - 60]              | 1        | 1     | 3     | 13    | 34    | 5     |
| > 60                   | 0        | 1     | 1     | 6     | 43    | 94    |

### 3.2.2. Morfologia das Vertentes

Juntamente com outros fatores, o modo como a água circula e se distribui pela superfície do terreno e/ou subsuperficialmente, desde o topo até à base, pode condicionar a ocorrência de deslizamentos (Garcia, 2012). Neste sentido, a morfologia do terreno em geral, e mais concretamente o perfil de uma vertente, pode influenciar o modo como a água nela se distribui. De acordo com Garcia (2012) e Oliveira (2012), o perfil de uma vertente pode ser encarado de várias formas: transversalmente, isto é, “corta” a vertente na horizontal paralelamente à sua base, em que esta análise permite verificar a direção do fluxo; longitudinalmente no sentido vertical, ou seja, de montante para jusante e permite analisar a aceleração e desaceleração dos fluxos; e a curvatura, que resulta das conjugação das duas anteriores.

Para o cálculo destes três tipos simples de perfil, foi utilizado o *software* ArcGIS 10.1, que os gerou de forma automática os perfis partir do MNE. No perfil transversal (*plan curvature*) e no perfil curvatura (*tangential curvature*), valores positivos representam



as vertentes convexas e os negativos indicam as vertentes côncavas. No caso de perfis longitudinais (*profile curvature*), valores positivos representam as vertentes côncavas e os negativos indicam as vertentes convexas. Já as superfícies retilíneas ou planas são representadas pelo valor “zero”.

Tal como é referido em Garcia (2012), o cálculo destes perfis é influenciado pela dimensão da célula utilizada. Neste contexto e seguindo o mesmo procedimento, realizaram-se três perfis transversais, com diferentes resoluções (10, 25 e 50 m), onde posteriormente se sobrepôs as curvas de nível de modo a facilitar a comparação.

O perfil realizado com a resolução mais baixa (célula de 50 m), embora tenha um grau de generalização maior, é aquele que melhor se adequa à forma da vertente indicada pelas curvas de nível (Figura 3-8). Neste sentido, a resolução de 50 m foi a preferida para a realização do perfil topográfico, sendo posteriormente convertida para a resolução de 10 m, de modo a permitir o cruzamento com as áreas deslizadas e com os outros fatores condicionantes.

Tendo em conta que o objetivo é diferenciar as superfícies côncavas, planas/retilíneas e convexas, os dados foram classificados, sendo os valores positivos e negativos, discriminantes de cada uma das superfícies (côncavas e convexas) consoante o tipo de perfil, tal como já referido anteriormente.

A representação da classe plana/retilínea, foi obtida com os valores próximos de 0, compreendidos entre  $\pm 0,0025$  (Garcia, 2012; Zêzere *et al.*, 2009 e Clerici *et al.*, 2010).

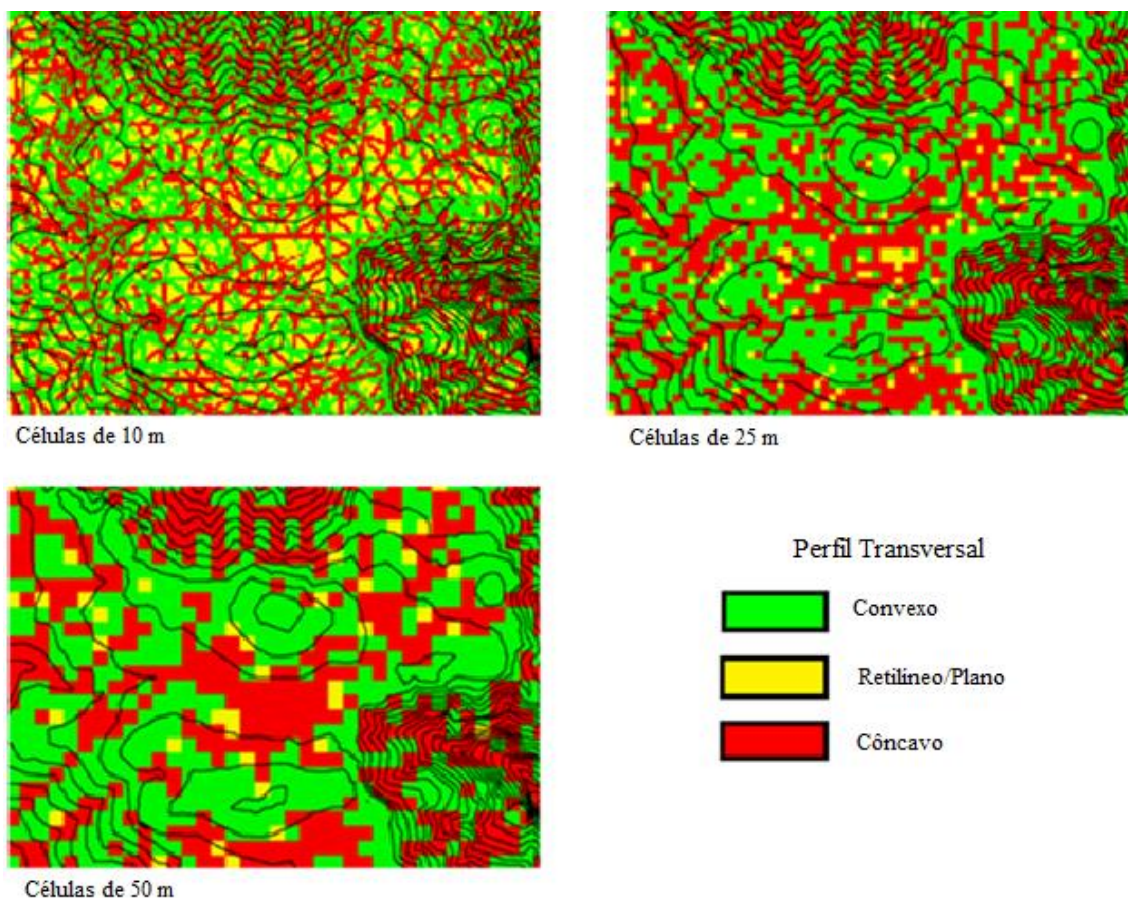


Figura 3-8 - Exemplo do perfil transversal de vertente obtido com base em várias resoluções.

Embora na prática fosse possível utilizar-se os três parâmetros em simultâneo, esse facto não traria maior capacidade discriminante ao modelo, uma vez que todos eles se referem à mesma condicionante que se pretende representar. Esse facto poderia também trazer problemas para o modelo devido à elevada autocorrelação entre estes parâmetros. Neste sentido, para saber qual dos parâmetros a utilizar, optou-se por verificar qual deles apresenta um melhor grau de ajuste do modelo aos dados. Neste sentido foi calculada a taxa de sucesso para cada parâmetro de curvatura (Figura 3-9).

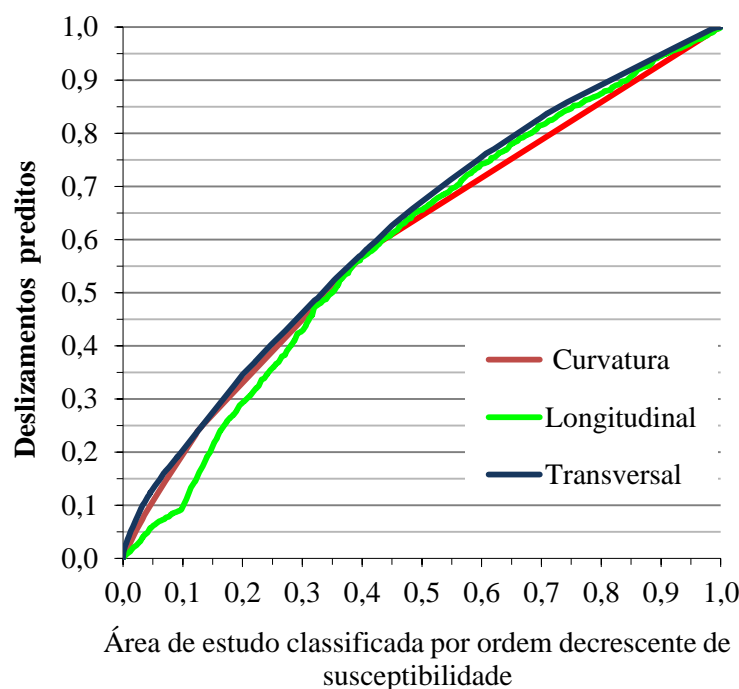


Figura 3-9 - Curvas de sucesso para a modelação da ocorrência de deslizamentos na ilha da Madeira, com diferentes tipos de perfis topográficos

Como se pode verificar, o perfil transversal é o parâmetro que apresenta um melhor grau de ajuste do modelo aos dados (Quadro 3.6) optando-se assim, pela utilização única deste parâmetro.

Quadro 3.6 - Graus de ajuste (AAC) aos movimentos de vertente dos vários tipos de perfis topográficos

| Perfis | Curvatura | Longitudinal | Transversal |
|--------|-----------|--------------|-------------|
| AAC    | 0,6       | 0,59         | 0,62        |

A Figura 3-10 espacializa a distribuição dos perfis transversais presentes na ilha da Madeira, onde se pode observar que, quer o perfil côncavo quer o convexo encontram-se distribuídos uniformemente por toda a ilha, enquanto o perfil retilíneo se encontra sobretudo no planalto do Paul da Serra.



Figura 3-10 - Perfis Transversais das vertentes na ilha da Madeira

Como se pode observar no Quadro 3.7, 52,5 % das vertentes possuem perfil convexo e 46,9 % possuem perfil côncavo, restando apenas 0,6 % para as áreas onde o perfil é considerado retilíneo/plano. O cruzamento desta condicionante com as áreas deslizadas, indica que a percentagem maior de área deslizada (55,4 %) ocorre na classe côncava (PTV1), enquanto a classe convexa (PTV3), compreende cerca de 44,4 % da área deslizada.

Quadro 3.7 - Frequência das classes de perfil (ha e %) e fração (%) do total da área deslizada em cada classe de perfil.

| Código      | Designação | Área da classe |      | Área deslizada |       |
|-------------|------------|----------------|------|----------------|-------|
|             |            | (ha)           | (%)  | (ha)           | (%)   |
| <b>PTV1</b> | Côncavo    | 34730          | 46,9 | 19,37          | 55,42 |
| <b>PTV2</b> | Retilíneo  | 442            | 0,6  | 0,05           | 0,14  |
| <b>PTV3</b> | Convexo    | 38873          | 52,5 | 15,53          | 44,43 |

Ao analisar-se a probabilidade condicionada (Figura 3-11), verifica-se que a classe que corresponde ao perfil côncavo, é onde a probabilidade condicionada é mais elevada, seguida da classe correspondente ao perfil convexo. O perfil retilíneo é o que regista menor valor.

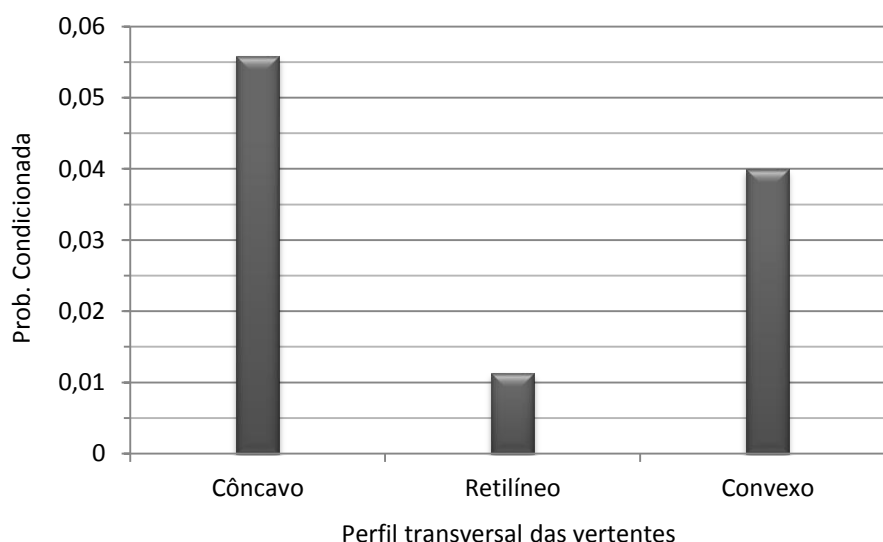


Figura 3-11 - Probabilidade condicionada (x100) por classe de perfil de vertentes.

### 3.2.3. Litologia

O tipo de litologia que compõe o substrato é uma importante condicionante dos movimentos de vertente, sendo por isso muito utilizada na análise da suscetibilidade à ocorrência desses movimentos. Fatores como a coesão dos materiais, o ângulo de atrito interno, a permeabilidade, a circulação e/ou armazenamento de água, influenciam a capacidade de resistência à rutura, aquando de um evento desencadeante, como é o caso da precipitação (Teixeira, 2005; Garcia, 2012).

A informação relativa à litologia provém da notícia explicativa da Carta Geológica da ilha da Madeira na escala 1:50000, folhas A e B, de Silveira *et al.* (2010), nesta carta encontram-se representados 31 tipos de formações geológicas distribuídas pelas várias unidades estratigráficas já referidas no ponto 1.2.1.

A ilha da Madeira é composta, maioritariamente por derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basaltos e basanitos), produto das três fases principais de construção do grande vulcão escudo da Madeira (Silveira *et al.*, 2010). Algumas destas formações são constituídas pelo mesmo tipo de litologia (basaltos e basanitos), como é o caso da UL8, UL11 e UL15 (Quadro 3.8), que numa primeira análise poderia levar à sua junção numa única classe. Contudo, devido à dimensão destas unidades litológicas, que no seu conjunto totalizam 82,4% da área de estudo e por terem espessuras e graus de alteração desiguais, optou-se por analisá-las separadamente.

A grande maioria da área deslizada (82,4 %) ocorreu em apenas três classes litológicas, que correspondem a 64 % do total da área total da ilha da Madeira. A UL15 compreende cerca de 32 % da área de estudo e 42,4 % do total da área deslizada. Encontra-se distribuída sobretudo em toda a vertente sul da ilha, cobrindo quase na totalidade os concelhos da Calheta e Ponta do Sol (Quadro 3.8). Encontra-se igualmente bem representada também nos concelhos do Funchal e Santa Cruz, sobretudo acima dos 500 metros de altitude.

As UL11 e UL8 compreendem, respetivamente, cerca de 16,6 % e 15,5 % da área de estudo, bem como 17,3 % e 22,8 % da área deslizada. Encontram-se distribuídas um pouco por toda a ilha (Figura 3-12).

A Figura 3-12 mostra a distribuição espacial das diversas UL existentes na ilha da Madeira.

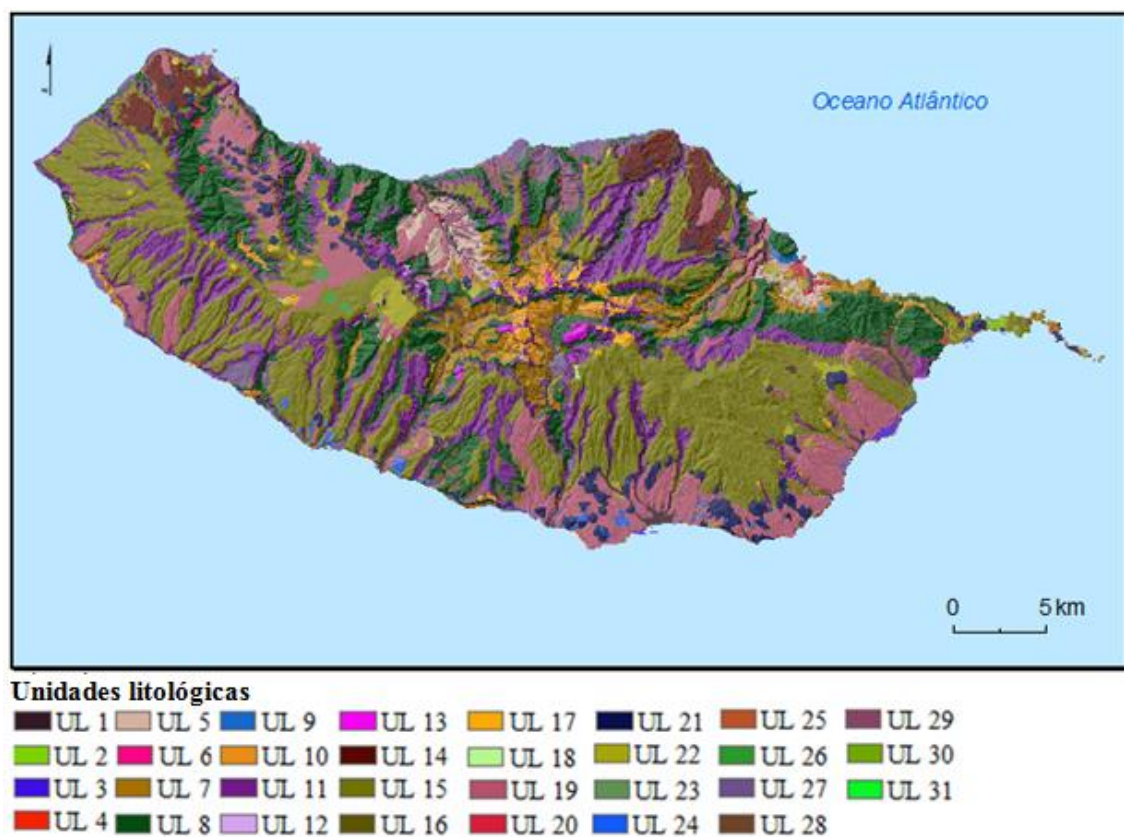


Figura 3-12 - Distribuição espacial das unidades litológicas presentes na ilha da Madeira (Fonte: Silveira *et al.*, 2010).



Quadro 3.8 - Frequência das classes litológicas (ha e %) e fração (%) do total da área deslizada em cada classe litológica.

| Unidades Litológicas |        |   | Área da classe |       | Área deslizada |      |
|----------------------|--------|---|----------------|-------|----------------|------|
| Símbolo              | Código | Designação  | (ha)           | (%)   | (ha)           | (%)  |
| a                    | UL 1   | Aluviões  | 1450           | 1,96  | 0,0            | 0,0  |
| ad                   | UL 2   | Depósitos de <i>lahar</i> constituídos por fácies conglomeráticas e brechóides associados a fluxos de detritos e fluxos de lama, e/ou depósitos de movimentos de massa, do tipo avalanche de detritos associados a depósitos de areias eólicas: arenitos finos, constituídos por bioclastos, minerolastos (incluindo olivina e piroxena) e litoclastos (basalto). Contêm fósseis de gasterópodes terrestres, rizo concreções carbonatadas, paleossolos e níveis de calcretos. | 41             | 0,06  | 0,0            | 0,0  |
| at                   | UL 3   | Aterro  | 98             | 0,13  | 0,0            | 0,0  |
| cap                  | UL 4   | Cascalheiras e areias de praias   | 30             | 0,04  | 0,0            | 0,0  |
| CVI1                 | UL 5   | Rochas máficas muito alteradas, palagonitizadas, de possível origem submarina e hidromagmática (hialoclastitos, brechas hialoclastíticas e derrames lávicos submarinos).  | 957            | 1,29  | 0,1            | 0,3  |
| CVI2                 | UL 6   | Depósitos sedimentares marinhos de baixa profundidade (fácies nerítica e recifal): conglomerados e microconglomerados matriz carbonatada, calcários e calcarenitos, fossilíferos.   | 2              | 0,00  | 0,0            | 0,0  |
| CVM1B                | UL 7   | Produtos vulcânicos subaéreos de composição máfica, geralmente muito alterados, e sedimentos detríticos, indiferenciados: Derrames lávicos, depósitos piroclástico de queda (tufos), brechas vulcânicas e depósitos de fluxo piroclástico (do tipo <i>block-and-ash flow</i> ); intercalações sedimentares ( <i>lahares</i> ) de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas associadas a fluxos de detritos ou fluxos de lama.   | 3488           | 4,70  | 2,2            | 6,3  |
| CVM2B                | UL 8   | Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basanitos e basaltos), com intercalações ocasionais de tufos basálticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas) e produtos de atividade freato-magmática.  | 11486          | 15,49 | 8,0            | 22,8 |
| CVM2g                | UL 9   | Depósitos sedimentares de fácies brechóides, conglomeráticas e areníticas grosseiras, associados a fluxos detríticos ou fluxos de lama ( <i>lahares</i> ) e ocasionais depósitos de avalanche de detritos relacionados com deslizamentos.   | 148            | 0,20  | 0,0            | 0,0  |
| CVM2pi               | UL 10  | Depósitos piroclásticos máficos subaéreos indiferenciados: tufos de escórias e <i>lapilli</i> de cones estrombolianos/havaianos, piroclastos de queda distais e ocasionais produtos freatomagmáticos.   | 1125           | 1,52  | 0,2            | 0,5  |
| CVM3B                | UL 11  | Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basanitos e basaltos), com intercalações de depósitos piroclásticos de queda (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas), níveis de tufos e ocasionais produtos máficos de atividade freato-magmática.  | 12304          | 16,59 | 6,0            | 17,3 |
| CVM3g                | UL 12  | Depósitos sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas, associados a fluxos de detritos ou fluxos de lama ( <i>lahares</i> ) e fluxos hiperconcentrados.   | 82             | 0,11  | 0,1            | 0,3  |
| CVM3pi               | UL 13  | Depósitos piroclásticos máficos subaéreos indiferenciados: tufos de escórias e <i>lapilli</i> de cones estrombolianos/havaianos, piroclastos de queda distais, ocasionais produtos de atividade freato-magmática e  | 197            | 0,27  | 0,3            | 0,9  |

| Unidades Litológicas |        |  | Área da classe |       | Área deslizada |      |
|----------------------|--------|--|----------------|-------|----------------|------|
| Símbolo              | Código | Designação   | (ha)           | (%)   | (ha)           | (%)  |
|                      |        | níveis de tufos de cinzas traquíticas, ricas em cristais de feldspato (sanidina).  |                |       |                |      |
| CVS1_2               | UL 14  | Unidades dos Lombos e do Funchal indiferenciadas.  | 1923           | 2,59  | 0,1            | 0,3  |
| CVS1B                | UL 15  | Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basaltos e basanitos), com intercalações de tufitos, depósitos piroclásticos de queda (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas) e ocasionais produtos máficos de atividade freato-magmática. | 23714          | 31,97 | 15,3           | 43,7 |
| CVS1g                | UL 16  | Depósitos sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas, associados a fluxos de detritos ou a fluxos de lama ( <i>lahares</i> ) e fluxos hiperconcentrados.  | 17             | 0,02  | 0,0            | 0,0  |
| CVS1pic              | UL 17  | Depósitos piroclásticos máficos subaéreos: blocos e bombas, <i>lapilli</i> e cinzas de cones estrombolianos/havaianos.   | 523            | 0,71  | 0,4            | 1,1  |
| CVS1pid              | UL 18  | Depósitos piroclásticos máficos subaéreos distais: cinzas e <i>lapilli</i> de queda, geralmente alterados.   | 37             | 0,05  | 0,1            | 0,3  |
| CVS2B                | UL 19  | Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basaltos), com intercalações ocasionais de piroclásticos de queda (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas) e produtos de atividade freato-magmática.  | 8753           | 11,80 | 1,0            | 2,9  |
| CVS2g                | UL 20  | Depósitos sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas, associados a fluxos de detritos ou fluxos de lama ( <i>lahares</i> ) e fluxos hiperconcentrados canalizados.  | 200            | 0,27  | 0,0            | 0,0  |
| CVS2pic              | UL 21  | Depósitos piroclásticos máficos subaéreos: blocos e bombas, <i>lapilli</i> e cinzas de cones estrombolianos/havaianos.   | 2308           | 3,11  | 0,4            | 1,1  |
| CVS2pid              | UL 22  | Depósitos piroclásticos máficos subaéreos distais: cinzas e <i>lapilli</i> de queda, geralmente alterados.   | 969            | 1,31  | 0,2            | 0,5  |
| CVS2pihB             | UL 23  | Depósitos piroclásticos máficos submarinos (surtseianos): tufos de cinzas, <i>lapilli</i> , blocos e bombas.   | 10             | 0,01  | 0,0            | 0,0  |
| CVS2pihT             | UL 24  | Depósitos piroclásticos hidroplinianos traquíticos (tufos de cinzas e pedra-pomes), com intercalações de piroclastos hidromagmáticos máficos, piroclastos subaéreos de queda e níveis de tufito.   | 350            | 0,47  | 0,0            | 0,0  |
| CVS2u                | UL 25  | derrames lávicos subaéreos de composição mugarítica.   | 32             | 0,04  | 0,0            | 0,0  |
| dgp                  | UL 26  | Depósitos glaciares e periglaciares: moreias, sedimentos microconglomerados e conglomeráticos de matriz silto-argilosa ( <i>till</i> ); produtos de processos de gelificação: escombrelas.   | 104            | 0,14  | 0,0            | 0,0  |
| dm                   | UL 27  | Depósitos de movimentos de massa, do tipo avalanche de detritos associados a deslizamentos e desabamentos; brechas sedimentares, conglomerados e megablocos de rocha fraturada.  | 1642           | 2,21  | 0,2            | 0,5  |
| dv                   | UL 28  | Depósitos de vertente e coluviões.   | 1381           | 1,86  | 0,3            | 0,8  |
| la                   | UL 29  | Depósitos de <i>lahar</i> constituídos por fácies conglomeráticas e brechóides associados a fluxos de detritos e fluxos de lama, e/ou depósitos de movimentos de massa, do tipo avalanche de detritos associados a deslizamentos.                  | 786            | 1,06  | 0,1            | 0,3  |
| T                    | UL 30  | Rochas granulares máficas: gabros.   | 4              | 0,01  | 0,0            | 0,0  |
| t                    | UL 31  | Traquitos  | 5              | 0,01  | 0,0            | 0,0  |



Ao analisar-se a probabilidade condicionada, expressa na Figura 3-13, verifica-se que é na UL18 que corresponde o valor mais elevado, seguindo-se a UL13 e a UL 12.

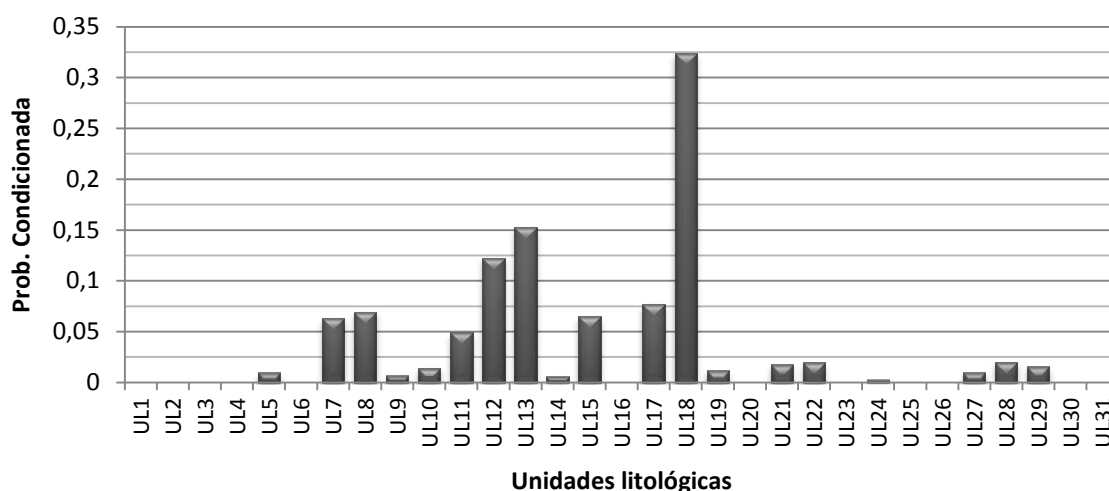


Figura 3-13 - Probabilidade condicionada (x100) por classe de unidades litológicas

### 3.2.4. Solos

O tipo do solo é outra condicionante que pode ter influência nos deslizamentos, quer pelo tipo dos materiais constituintes, quer pela espessura dos mesmos. O solo caracteriza-se por ser um material menos resistente e mais suscetível à alteração do que a litologia. A menor coesão dos seus materiais, aliado ao facto de assentarem sobre um substrato mais compacto e impermeável, facilita a saturação e a instabilidade no contacto entre estas duas formações, sendo por isso mais suscetíveis de se movimentarem (Teixeira, 2005).

A infiltração e o bloqueio da água no contacto com uma formação impermeável pode originar um plano de acumulação de água que constitui um lubrificante capaz de reduzir o atrito e a correspondente sobreposição das forças tangenciais originando a movimentação da vertente (Bateira, 2001).

Na ilha da Madeira os solos são principalmente, solos arenoargilosos ou argilosos, ácidos, pobres em potássio e muito pobres em cálcio, ricos em matéria orgânica, magnésio, ferro, alumínio e medianamente providos de azoto e fósforo (PRAM, 2002).

De acordo com a Carta dos Solos da Ilha da Madeira, publicada em 1992, existem na ilha da Madeira 15 unidades-solo, distribuídas por 8 grupos principais:

Fluvissoles, Leptossoles, Arenossoles, Andossoles, Vertisssoles, Cambisssoles, Calcisssoles e Faeozemes.

Os Fluvissoles (FL) observados na ilha da Madeira encontram-se em duas unidades-solo: os “Fluvissoles êutricos” (FLe) e os “Fluvissoles dístricos” (FLd). São caracterizados por serem de origem aluvionar (mas também com alguma influência coluvional), constituídos por depósitos não consolidados muito heterogêneos e localizam-se nas margens estreitas das linhas de água.

Os Leptossoles (LP) são solos pedregosos na sua maior parte podendo ainda terem associados afloramentos rochosos e exibirem certa pedregosidade superficialmente. Apresentam a menos de 30 cm de profundidade rocha dura contínua ou material fortemente calcário (> 40%). Encontram-se distribuídos por toda a ilha, em variadas condições climáticas.

Os Arenossoles (AR) são encontrados apenas sob a forma de “Arenossoles calcários” (ARe). Este tipo de solo é formado a partir de areias de dunas de natureza calcária, sendo caracterizado pela sua permeabilidade muito rápida à água. Estes solos ocorrem na Ilha da Madeira unicamente na Ponta de São Lourenço sob clima semiárido.

Os Andossoles (AN) são constituídos por 4 unidades-solo, nomeadamente, “Andossoles háplicos” (ANh), “Andossoles mólicos” (ANm), “Andossoles úmbricos” (ANu) e “Andossoles vítricos” (ANz). As unidades-solo “Andossoles úmbricos” e “Andossoles háplicos” derivam principalmente de rochas basálticas, embora também se possam originar a partir de tufo. São ricos em matéria orgânica, encontrando-se sobretudo acima de 400 m de altitude. Os “Andossoles vítricos” são constituídos predominantemente por materiais soltos de piroclastos grosseiros, muito permeáveis à água. Os “Andossoles mólicos” encontram-se com muito pouca frequência.

Os Vertisssoles (VR) encontram-se apenas sob a forma de “Vertisssoles êutricos” (VRe). Admite-se que derivem apenas de rochas basálticas de natureza compacta e encontram-se em áreas com clima semiárido e sub-húmido, localizando sobretudo na costa sul abaixo de 200 m.

Os Cambisssoles (CM) subdividem-se em 5 unidades-solo, nomeadamente, “Cambisssoles êutricos” (CMe), “Cambisssoles dístricos” (CMd), “Cambisssoles húmicos” (CMu), “Cambisssoles crómicos” (CMx) e “Cambisssoles vétricos” (CMv).

Derivam principalmente de rochas basálticas, mas também a partir de tufos e, muito raramente, de piroclastos grosseiros. Localizam-se onde o clima varia de semiárido a húmido, geralmente abaixo de 700 m.

Os Calcissolos (CL) encontram-se em apenas uma unidade-solo, a “Calcissolos háplicos” (CLh). Caracterizam-se por derivarem de rochas basálticas e piroclastos, encontram-se apenas sob clima semiárido. Na Ilha da Madeira, localizam-se apenas na Ponta de S. Lourenço e nos ilhéus situados a este, a altitudes abaixo de 100 m.

Os Faeozemes (PH) encontram-se apenas sob a forma de “Faeozemes háplicos” (PHh). Caracterizam-se por derivarem principalmente de rochas basálticas, localizam-se em zonas abaixo de 600 m de altitude, em áreas sob um clima sub-húmido a húmido. É necessário referir ainda a existência de tipos especiais de terreno na ilha da Madeira, que se encontram cartografados na referida carta de solos, como é o caso dos seguintes:

- Depósito de praia (DP): áreas de deposição de material grosseiro rolado de origem basáltica, maioritariamente com granulometria de calhaus, que ocorrem ao longo da costa;
- Terreno Rochoso (TR): áreas com uma certa continuidade, ocupadas por afloramentos rochosos de origem basáltica. O Terreno Rochoso divide-se em dois conjuntos: o Terreno Rochoso Êutrico (TRe), que localiza-se abaixo de 600 m de altitude, em áreas sob um clima semiárido a húmido, encontrando-se num grau de saturação acima dos 50%; o Terreno Rochoso Dístrico (TRd) localiza-se em áreas sob um clima húmido a super-húmido sobretudo a partir dos 200 m de altitude. O grau de saturação é inferior a 50%;
- Terreno Acidentado (TA): unidade que engloba áreas predominantemente montanhosas e sem escarpas (as mais frequentes), áreas montanhosas com maior ou menor extensão de escarpas e também, embora em pequenas quantidades, áreas exclusivamente escarpadas.

O Terreno Acidentado divide-se em dois conjuntos: o Terreno Acidentado Êutrico (TAe), que localiza-se essencialmente em altitude até 600 m, sob um clima semiárido a húmido e engloba unidades-solo VRe, CMe, CMx, CMv, CLh e PHh; o Terreno Acidentado Dístrico (TAd), localiza-se sobretudo a partir de 200 m, sob um clima húmido a super-húmido e engloba as unidades-solo ANh, ANu, CMd e CMu;

- Acumulações Salinas (S): área em tempos ocupada por salinas, que apresenta ainda hoje uma elevada concentração salina à superfície. Esta área situa-se próxima ao Paul do Mar e ocupa uma área de 24 m<sup>2</sup>; devido à sua área diminuta, foi integrada na classe S13 (FHh) que a rodeia.

Foi ainda criada uma nova classe denominada “Social” para integrar todas as áreas urbanas que não vêm na carta de solos, mas que era necessário preencher, a fim de evitar erros aquando do cruzamento com outros mapas.

A Figura 3-14 exhibe a distribuição espacial dos principais tipos de solos existentes na ilha da Madeira. Como se pode verificar, praticamente todo o setor interior da ilha é composto por terrenos acidentados e por andossolos sendo que os restantes tipos de solos se encontram predominantemente junto à faixa costeira.

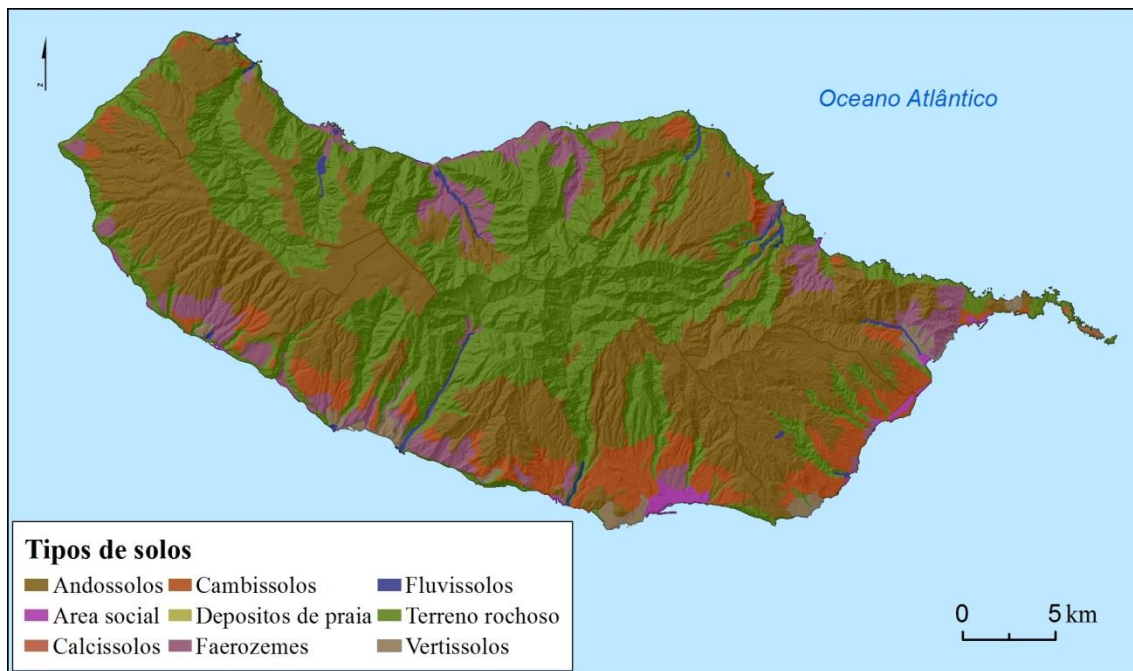


Figura 3-14 - Distribuição espacial dos tipos de solos presentes na ilha da Madeira (Fonte: Carta dos solos da ilha da Madeira, 1992)

Como se verifica no Quadro 3.9, as unidades de solo com maior expressão na ilha da Madeira são os andossolos húmicos com 40,7 % seguidos dos terrenos acidentados dísticos que ocupam 32,2 % da área total. O grupo dos cambissolos representa 7,9 % e os faeozemes 7 %. O cruzamento do mapa de solos com as áreas deslizadas, revela que 56,3 % da área deslizada insere-se na unidade terrenos acidentados (46,2 % nos TAd e 10,1 % nos TAe), enquanto a unidade Andossolos incorpora 36,7 % da área deslizada.

Quadro 3.9 - Frequência das classes de solo, (ha e %) e fração (%) do total da área deslizada em cada classe de solo.

| Código     | Grupos de Solo e áreas sem solo   | Área da classe |      | Área deslizada |      |
|------------|-----------------------------------|----------------|------|----------------|------|
|            |                                   | (ha)           | (%)  | (ha)           | (%)  |
| <b>S1</b>  | Andossolos húmicos (ANu)          | 30156,7        | 40,7 | 12,8           | 36,7 |
| <b>S2</b>  | Andossolos vítricos (ANz)         | 590,2          | 0,8  | 0,0            | 0,0  |
| <b>S3</b>  | Calcissolos háplicos (CLh)        | 33,7           | 0,0  | 0,0            | 0,0  |
| <b>S4</b>  | Cambissolos dístricos (CMd)       | 125,6          | 0,2  | 0,0            | 0,0  |
| <b>S5</b>  | Cambissolos êutricos (CMe)        | 359,8          | 0,5  | 0,04           | 0,1  |
| <b>S6</b>  | Cambissolos húmicos (CMu)         | 1424,3         | 1,9  | 1,1            | 3,2  |
| <b>S7</b>  | Cambissolos vítricos (CMv)        | 60,2           | 0,1  | 0,0            | 0,0  |
| <b>S8</b>  | Cambissolos Crómicos (CMx)        | 3846,7         | 5,2  | 0,5            | 1,5  |
| <b>S9</b>  | Depósito de praia (DP)            | 3,3            | 0,0  | 0,0            | 0,0  |
| <b>S10</b> | Fluvisolos dístricos (FLd)        | 162,3          | 0,2  | 0,0            | 0,0  |
| <b>S11</b> | Fluvisolos êutricos (FLe)         | 472,5          | 0,6  | 0,0            | 0,0  |
| <b>S12</b> | Faeozemes háplicos (PHh)          | 5164,1         | 7,0  | 0,7            | 1,9  |
| <b>S13</b> | Social                            | 490,5          | 0,7  | 0,0            | 0,0  |
| <b>S14</b> | Terreno acidentado dístrico (TAd) | 23907,2        | 32,2 | 16,1           | 46,2 |
| <b>S15</b> | Terreno acidentado êutrico (TAe)  | 4173,8         | 5,6  | 3,5            | 10,1 |
| <b>S16</b> | Terreno rochoso dístrico (TRd)    | 1801,3         | 2,4  | 0,1            | 0,4  |
| <b>S17</b> | Terreno rochoso êutrico (TRe)     | 509,3          | 0,7  | 0,0            | 0,0  |
| <b>S18</b> | Vertissolos êutricos (VRe)        | 884,7          | 1,2  | 0,01           | 0,03 |

Na Figura 3-15 está quantificada a probabilidade condicionada de se encontrar área deslizada em cada classe de solo. Assim, os terrenos acidentados (dístricos e êutricos), juntamente com os cambissolos húmicos, são os que apresentam uma maior probabilidade condicionada, seguidos dos Andossolos húmicos.

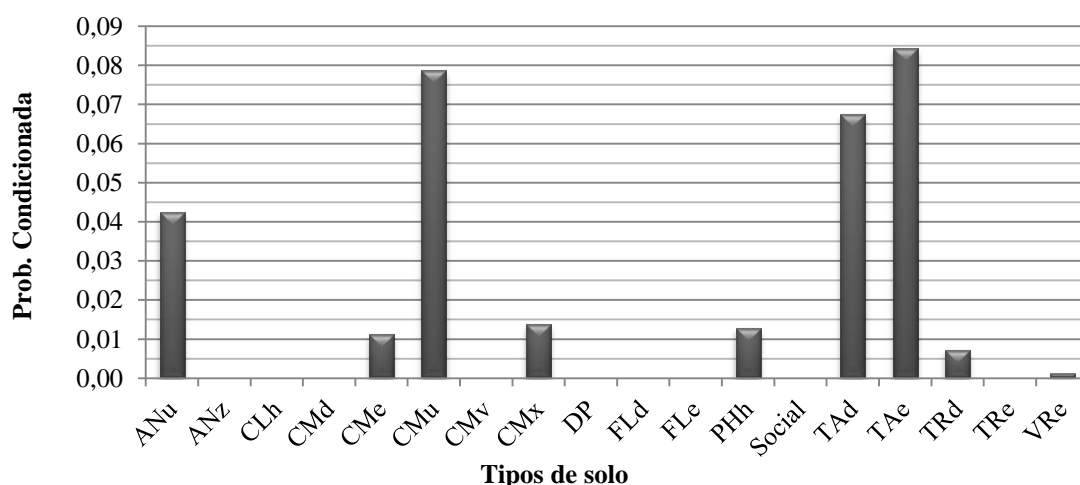


Figura 3-15 - Probabilidade condicionada (x100) por classe de solo.

### **3.2.5. Ocupação do Solo**

A ocupação do solo, na presença de um fator desencadeante, nomeadamente a precipitação, influencia as condições hidrológicas e a resistência dos solos e rochas (Garcia, 2012).

A ocupação do solo afigura-se enquanto um dos fatores com maior disposição para a ocorrência de alterações mais significativas à escala humana, sendo que as numerosas obras, quer em infraestruturas quer em equipamentos, levadas a cabo na ilha da Madeira nos últimos anos são testemunho disso mesmo.

A ocupação do solo na ilha da Madeira é maioritariamente composta por florestas (OS7), com 44,1 %, e por florestas abertas, vegetação arbustiva e herbácea (OS8), com 33,6 %, perfazendo um total de 77,7 % da ilha (Quadro 3.10). As florestas distribuem-se maioritariamente entre 500 e 1000 metros de altitude, enquanto a classe OS8 distribui-se sobretudo no interior da ilha, em altitudes próximas ou superiores a 1000 metros. O tecido urbano (OS11) ocupa 5,6 %, as culturas temporárias (OS5) 5,1 % e as áreas agrícolas heterogéneas (OS2) 4,2 %. Tais classes de ocupação do solo encontram-se distribuídas maioritariamente na vertente sul da ilha, abaixo de 500 metros.

A Figura 3-16 diz respeito à distribuição espacial das diversas classes de ocupação do solo existentes na ilha da Madeira, onde se pode verificar, que o interior da ilha é maioritariamente composto por florestas, florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea. O tecido urbano encontra-se sobretudo junto ao litoral.



#### Ocupação do solo

- Áreas de extracção de inertes, áreas de deposição de resíduos e estaleiros de construção
- Áreas Agrícolas Heterogéneas
- Águas interiores
- Zonas húmidas litorais
- Zonas húmidas interiores
- Zonas Descobertas e com pouca vegetação
- Tecido Urbano
- Pastagens Permanentes
- Indústria, Comércio e Transportes
- Florestas Abertas, Vegetação Arbustiva e Herbácea
- Florestas
- Espaços Verdes Urbanos, Equipamentos Desportivos, Culturais e de Lazer e Zonas Históricas
- Culturas temporárias
- Culturas Permanentes

Figura 3-16 - Distribuição espacial dos vários tipos de ocupação do solo.

Analisando a relação desta condicionante com os deslizamentos, verifica-se que cerca de 70,8 % da área deslizada ocorre na classe OS8 (florestas abertas, vegetação arbustiva e herbácea) e 24,3 % na classe OS7 (florestas).

Quadro 3.10 - Frequência das classes de ocupação do solo (ha e %) e fração (%) do total da área deslizada em cada classe de ocupação do solo

| Código | Designação  | Área da classe |      | Área deslizada |      |
|--------|---|----------------|------|----------------|------|
|        |   | (ha)           | (%)  | (ha)           | (%)  |
| OS1    | Águas interiores  | 288,9          | 0,4  | 0,0            | 0,0  |
| OS2    | Áreas agrícolas heterogéneas  | 3084,0         | 4,2  | 0,6            | 1,6  |
| OS3    | Áreas de extração de inertes, áreas de deposição de resíduos e estaleiros de construção   | 332,1          | 0,4  | 0,0            | 0,1  |
| OS4    | Culturas permanentes  | 2036,4         | 2,7  | 0,2            | 0,5  |
| OS5    | Culturas temporárias  | 3790,4         | 5,1  | 0,3            | 0,8  |
| OS6    | Espaços verdes urbanos; Equipamentos desportivos, culturais e de lazer e zonas históricas | 377,9          | 0,5  | 0,0            | 0,0  |
| OS7    | Florestas   | 32652,1        | 44,1 | 8,5            | 24,3 |
| OS8    | Florestas abertas; Vegetação arbustiva e herbácea   | 24928,5        | 33,6 | 24,8           | 70,8 |
| OS9    | Indústria, comércio e transportes   | 1245,6         | 1,7  | 0,0            | 0,1  |
| OS10   | Pastagens permanentes   | 190,0          | 0,3  | 0,2            | 0,5  |
| OS11   | Tecido urbano   | 4180,7         | 5,6  | 0,0            | 0,1  |
| OS12   | Zonas descobertas e com pouca vegetação   | 938,7          | 1,3  | 0,4            | 1,2  |
| OS13   | Zonas húmidas interiores  | 76,4           | 0,1  | 0,0            | 0,0  |
| OS14   | Zonas húmidas litorais  | 1,6            | 0,0  | 0,0            | 0,0  |

Como se verifica na Figura 3-17, a classe correspondente às florestas abertas, vegetação arbustiva e herbácea, é a que regista maior probabilidade condicionada para a ocorrência de deslizamentos, seguida das classes, pastagens permanentes e zonas descobertas e com pouca vegetação.

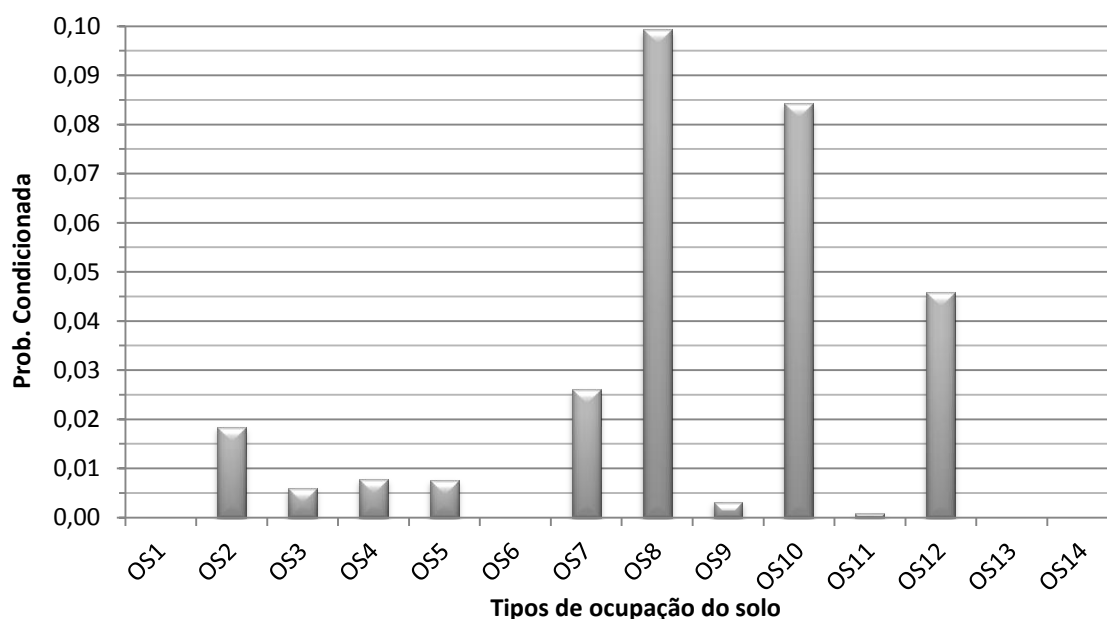


Figura 3-17 - Probabilidade condicionada (x100) por classe de ocupação do solo.



### 3.3. CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS

A quantificação do grau de associação entre os fatores condicionantes foi efetuada com base no coeficiente de contingência modificado (C\*), também utilizado em Almeida (2013) e Garcia (2012).

Este coeficiente pode variar entre 0 (inexistência de associação) e 100 (associação perfeita). Analisando os valores de C\* para cada par dos 7 fatores condicionantes utilizados (Quadro 3.11), verifica-se que os valores de associação entre fatores são na maioria dos casos inferiores a 50 %, o que indica uma independência entre os fatores condicionantes, onde se destaca a relação entre o Perfil Transversal (PTV), com o Tipo de Solos (SOLOS), e o PTV com a Ocupação do Solo (COS), ambos com valores inferiores a 10 %. Em sentido contrário, com uma dependência relativamente forte entre as Unidades Litológicas (GEO) e os Tipos de Solos (SOLOS), 76,5 %, seguido da relação entre o Índice Topográfico de Humidade (ITH) e o Declive (DEC), com 75,3 %. Apesar de existir uma associação relativamente elevada, optou-se pela inclusão de ambos os fatores condicionantes no modelo de suscetibilidade, por estes serem determinantes no movimento de vertente.

Quadro 3.11 - Grau de associação (%) entre fatores condicionantes à ocorrência dos deslizamentos, com base no Coeficiente de Contingência Modificado.

|       | DEC  | COS  | EXP  | SOLOS | PTV  | ITH  | GEO |
|-------|------|------|------|-------|------|------|-----|
| DEC   |      |      |      |       |      |      |     |
| COS   | 46,6 |      |      |       |      |      |     |
| EXP   | 17,7 | 27,1 |      |       |      |      |     |
| SOLOS | 57,1 | 61,6 | 22,8 |       |      |      |     |
| PTV   | 12,7 | 9,6  | 18,2 | 8,0   |      |      |     |
| ITH   | 75,3 | 38,2 | 14,5 | 48,8  | 23,8 |      |     |
| GEO   | 58,9 | 58,3 | 32,0 | 76,5  | 13,7 | 53,1 |     |

## **CAPÍTULO 4. AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS**

Na avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos podem ser utilizados vários métodos, que resultam em diferentes mapas de suscetibilidade.

Quando se trabalha a uma escala regional, normalmente recorre-se a dois tipos de métodos: métodos diretos, baseados em critérios geomorfológicos, ou indiretos, de base estatística/probabilística (e.g. lógica difusa, regressão logística, valor informativo). Estes métodos desenvolvem-se através de várias fases: (i) identificação e inventário dos deslizamentos (ii) identificação e cartografia dos fatores condicionantes (iii) apuramento da contribuição de cada condicionante para a instabilidade das vertentes (iv) classificação em diferentes graus de suscetibilidade (Guzzetti *et al.*, 1999).

Nos métodos heurísticos os fatores condicionantes são ponderados de acordo com indexações geralmente semiquantitativas (Oliveira *et al.*, 2009). Os modelos de base estatística podem ser bivariados, em que o fenómeno se relaciona com cada condicionante individualmente, ou multivariados, em que o fenómeno se relaciona com todas as condicionantes em simultâneo.

### **4.1. O MÉTODO ESTATÍSTICO DE ANÁLISE**

Neste estudo, para a elaboração do modelo de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos, recorreu-se ao método do Valor Informativo (VI), aplicado numa base digital matricial com células de 10 metros. O VI descreve de forma quantitativa, sob a forma de uma pontuação, a relação entre cada condicionante (*i*) (variável independente) e os deslizamentos (variável dependente) (Oliveira, 2009; Garcia 2012; Almeida, 2013).

O valor informativo para cada condicionante ( $X_i$ ) é calculado através da seguinte equação (Yin e Yan, 1988):

$$li = \ln \frac{Si/Ni}{S/N}$$

Sendo que:

- $li$  – VI da condicionante  $i$ ;
- $Si$  – n.º de unidades de terreno com área deslizada, na presença da variável  $i$ ;
- $Ni$  – n.º de unidades de terreno com a condicionante  $i$ ;
- $S$  – n.º total de unidades de terreno deslizado;
- $N$  – n.º total de unidades de terreno na área em estudo.

Segundo Garcia (2012), a expressão  $X$  indica que a importância de cada uma das classes de cada condicionante é avaliada por um *score* que resulta da relação entre o que chama de densidade média espectável (probabilidade *a priori* –  $S/N$ ) e a probabilidade de o fenómeno ocorrer condicionado pela presença de uma determinada classe de uma condicionante (probabilidade condicionada –  $Si/Ni$ ).

Neste contexto, os valores obtidos indicam o posicionamento da classe ou unidade de terreno em relação à densidade média. Assim, a classe com valor nulo significa que tem uma densidade de deslizamentos igual à da área de estudo, o que torna inconclusiva a sua relação com a instabilidade. As classes com uma densidade superior à média (*scores* positivos) indicam maior propensão para deslizamentos, em oposição, as classes com *scores* negativos indicam menor propensão para a ocorrência de deslizamentos (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 - Valor Informativo (*scores*) para cada classe de cada fator condicionante, resultante dos 9 modelos efetuados (destacam-se com o fundo cinzento os valores mais baixos e a negrito os valores mais elevados).

| Condicionantes                 | Código / Classes | Total da ilha |             |             | Interior da ilha |             |             | Faixa costeira |             |             |
|--------------------------------|------------------|---------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
|                                |                  | >100          | >500        | >1000       | >100             | >500        | >1000       | >100           | >500        | >1000       |
| Índice topográfico de humidade | ITH1             | -0,05         | -1,57       | -1,84       | -1,38            | -1,45       | -1,29       | -0,23          | -0,90       | -1,41       |
|                                | ITH2             | -0,28         | -1,18       | -1,57       | -0,76            | -1,45       | -1,29       | 0,14           | -0,90       | -1,41       |
|                                | ITH3             | 0,10          | -0,10       | -0,38       | 0,13             | -0,10       | -0,33       | -0,03          | -0,74       | -1,00       |
|                                | ITH4             | <b>0,17</b>   | <b>0,20</b> | <b>0,24</b> | <b>0,19</b>      | <b>0,20</b> | 0,21        | -0,23          | 0,02        | 0,31        |
|                                | ITH5             | -0,23         | 0,15        | 0,36        | -0,30            | 0,13        | <b>0,37</b> | <b>0,39</b>    | <b>0,98</b> | <b>0,87</b> |
|                                | ITH6             | -1,29         | -1,57       | -1,84       | -1,38            | -1,34       | -2,19       | 0,03           | 0,81        | 0,70        |

| Condicionantes   | Código /<br>Classes | Total da ilha |             |             | Interior da ilha |             |             | Faixa costeira |             |             |
|------------------|---------------------|---------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
|                  |                     | >100          | >500        | >1000       | >100             | >500        | >1000       | >100           | >500        | >1000       |
| Exposições       | EV1                 | -0,69         | -1,29       | -3,60       | -1,01            | -1,45       | -2,79       | -2,37          | -1,36       | -0,48       |
|                  | EV2                 | -0,49         | -0,77       | -1,82       | -0,71            | -1,12       | -2,79       | <b>0,39</b>    | 0,55        | 0,24        |
|                  | EV3                 | -0,52         | -1,04       | -3,60       | -0,73            | -1,20       | -2,79       | 0,31           | -0,68       | -0,48       |
|                  | EV4                 | -0,17         | 0,00        | 0,02        | -0,11            | 0,01        | -0,03       | -2,37          | -1,36       | -0,48       |
|                  | EV5                 | <b>0,41</b>   | <b>0,56</b> | <b>0,79</b> | <b>0,50</b>      | <b>0,63</b> | <b>0,86</b> | -2,37          | -1,36       | -0,48       |
|                  | EV6                 | 0,18          | 0,22        | 0,07        | 0,16             | 0,12        | -0,01       | 0,13           | <b>1,31</b> | 1,02        |
|                  | EV7                 | 0,32          | 0,43        | 0,64        | 0,34             | 0,51        | 0,68        | -1,36          | -1,36       | -0,48       |
|                  | EV8                 | 0,11          | 0,02        | -0,07       | 0,16             | 0,01        | -0,08       | -0,19          | 0,72        | <b>1,53</b> |
|                  | EV9                 | -0,69         | -1,29       | -1,68       | -1,01            | -1,45       | -2,28       | 0,34           | -1,36       | -0,48       |
| Declives         | D1                  | -2,76         | -4,19       | -3,68       | -2,68            | -4,16       | -3,65       | -1,60          | -1,63       | -1,42       |
|                  | D2                  | -1,64         | -1,29       | -1,09       | -1,52            | -1,26       | -1,06       | -1,60          | -1,63       | -1,42       |
|                  | D3                  | -1,13         | -0,67       | -0,59       | -1,19            | -0,64       | -0,59       | -1,60          | -1,63       | -0,44       |
|                  | D4                  | -0,92         | -0,90       | -0,83       | -0,90            | -0,91       | -0,86       | -1,02          | -0,17       | 0,42        |
|                  | D5                  | -0,47         | -0,40       | -0,43       | -0,46            | -0,40       | -0,49       | -1,05          | 0,21        | <b>1,31</b> |
|                  | D6                  | -0,03         | -0,09       | -0,18       | 0,02             | -0,08       | -0,18       | -1,04          | <b>0,22</b> | 0,81        |
|                  | D7                  | 0,47          | 0,33        | 0,17        | 0,51             | 0,35        | 0,18        | -0,83          | -0,42       | -0,24       |
|                  | D8                  | <b>0,57</b>   | 0,38        | 0,27        | <b>0,59</b>      | 0,41        | 0,30        | -0,42          | -1,11       | -1,21       |
|                  | D9                  | 0,33          | 0,47        | 0,54        | 0,37             | 0,52        | 0,59        | -0,32          | -1,63       | -1,04       |
|                  | D10                 | 0,37          | <b>0,53</b> | <b>0,70</b> | 0,36             | <b>0,57</b> | <b>0,80</b> | 0,32           | -0,06       | -1,42       |
|                  | D11                 | 0,49          | 0,38        | 0,45        | 0,06             | 0,01        | 0,22        | <b>0,69</b>    | 0,97        | 0,84        |
| Ocupação do Solo | OS1                 | -3,90         | -3,82       | -3,31       | -3,42            | -3,80       | -2,60       | -2,82          | -0,51       | 0,00        |
|                  | OS2                 | -0,94         | -0,72       | -0,61       | -0,89            | -0,64       | -0,74       | -2,82          | -0,51       | 0,00        |
|                  | OS3                 | -2,06         | -0,89       | -3,31       | -2,68            | -1,96       | -2,60       | <b>0,56</b>    | -0,51       | 0,00        |
|                  | OS4                 | -1,79         | -3,82       | -3,31       | -1,94            | -3,80       | -2,60       | -2,82          | -0,51       | 0,00        |
|                  | OS5                 | -1,82         | -2,81       | -3,31       | -1,78            | -2,79       | -2,60       | -0,71          | -0,15       | 0,00        |
|                  | OS6                 | -3,90         | -3,82       | -3,31       | -3,42            | -2,06       | -0,45       | -2,82          | -0,51       | 0,00        |
|                  | OS7                 | -0,60         | -0,49       | -0,51       | -0,57            | -0,49       | -0,54       | -0,38          | -0,51       | 0,00        |
|                  | OS8                 | <b>0,74</b>   | <b>0,71</b> | <b>0,70</b> | <b>0,74</b>      | <b>0,72</b> | <b>0,72</b> | 0,50           | <b>0,52</b> | <b>0,62</b> |
|                  | OS9                 | -2,69         | -2,61       | -1,69       | -2,88            | -3,80       | -2,60       | -2,82          | -0,51       | 0,00        |
|                  | OS10                | 0,58          | 0,18        | -3,31       | 0,66             | 0,40        | -2,60       | -2,82          | -0,51       | 0,00        |
|                  | OS11                | -3,90         | -3,82       | -3,31       | -3,42            | -3,80       | -2,60       | -2,82          | -0,51       | 0,00        |
|                  | OS12                | -0,03         | 0,34        | 0,93        | 0,58             | 0,94        | 1,53        | -2,82          | -0,51       | 0,00        |
|                  | OS13                | -3,90         | -3,82       | -3,31       | -3,42            | -3,80       | -2,60       | -2,82          | -0,51       | 0,00        |
|                  | OS14                | -3,90         | -3,82       | -3,31       | ---              | ---         | ---         | -2,82          | -0,51       | 0,00        |

| Condicionantes                   | Código / Classes | Total da ilha |             |             | Interior da ilha |             |             | Faixa costeira |             |             |
|----------------------------------|------------------|---------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
|                                  |                  | >100          | >500        | >1000       | >100             | >500        | >1000       | >100           | >500        | >1000       |
| Unidades litológicas             | UL 1             | -0,40         | 0,41        | 0,28        | -0,43            | 0,45        | 0,31        | -2,25          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 2             | -2,80         | -1,79       | -2,54       | -2,50            | -1,97       | -2,52       | -2,25          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 3             | -2,80         | -1,79       | -2,54       | -2,50            | -1,97       | -2,52       | -2,25          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 4             | -2,80         | -1,79       | -2,54       | -2,50            | -1,97       | -2,52       | -2,25          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 5             | -1,61         | -1,79       | -2,54       | -1,26            | -1,97       | -2,52       | -2,25          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 6             | -2,80         | -1,79       | -2,54       | -2,50            | -1,97       | -2,52       | ---            | ---         | ---         |
|                                  | UL 7             | 0,30          | 0,63        | 0,77        | 0,32             | 0,70        | 0,84        | -1,68          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 8             | 0,39          | 0,70        | 0,94        | 0,42             | 0,75        | 1,00        | -0,28          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 9             | -1,94         | -1,79       | -2,54       | -2,50            | -1,97       | -2,52       | -0,53          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 10            | -1,20         | -1,79       | -2,54       | -1,10            | -1,97       | -2,52       | -2,25          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 11            | 0,04          | -0,17       | -0,59       | -0,03            | -0,21       | -0,66       | 0,66           | 0,45        | 0,24        |
|                                  | UL 12            | 0,95          | <b>1,72</b> | <b>2,24</b> | <b>1,19</b>      | <b>1,73</b> | <b>2,24</b> | ---            | ---         | ---         |
|                                  | UL 13            | 1,18          | 0,94        | 1,36        | 1,21             | 0,96        | 1,38        | -2,25          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 14            | -2,02         | -1,79       | -2,54       | -2,50            | -1,97       | -2,52       | <b>1,98</b>    | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 15            | 0,28          | 0,11        | 0,00        | 0,29             | 0,08        | -0,08       | 1,26           | <b>1,70</b> | <b>2,32</b> |
|                                  | UL 16            | -2,80         | -1,79       | -2,54       | -2,50            | -1,97       | -2,52       | -2,25          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 17            | 0,48          | 0,61        | 0,97        | 0,49             | 0,62        | 0,98        | -2,25          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 18            | <b>1,93</b>   | 0,90        | -2,54       | 1,80             | 0,91        | -2,52       | ---            | ---         | ---         |
|                                  | UL 19            | -1,41         | -1,79       | -2,54       | -1,57            | -1,97       | -2,52       | 0,41           | 0,79        | 0,00        |
|                                  | UL 20            | -2,80         | -1,79       | -2,54       | -2,50            | -1,97       | -2,52       | -2,25          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 21            | -1,00         | -0,98       | -1,01       | -1,02            | -1,40       | -0,98       | 0,46           | 1,47        | 0,00        |
|                                  | UL 22            | -0,88         | -0,75       | -2,54       | -1,34            | -0,72       | -2,52       | -0,85          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 23            | -2,80         | -1,79       | -2,54       | -2,50            | -1,97       | -2,52       | -2,25          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 24            | -2,80         | -1,79       | -2,54       | -2,50            | -1,97       | -2,52       | -2,25          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 25            | -2,80         | -1,79       | -2,54       | -2,04            | -1,97       | -2,52       | ---            | ---         | ---         |
|                                  | UL 26            | -2,80         | -1,79       | -2,54       | -2,50            | -1,97       | -2,52       | ---            | ---         | ---         |
|                                  | UL 27            | -1,58         | -1,79       | -2,54       | -1,58            | -1,47       | -2,52       | -2,25          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 28            | -0,84         | -1,62       | -2,20       | -0,86            | -1,57       | -2,15       | -0,40          | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 29            | -1,13         | -1,79       | -2,54       | -1,60            | -1,97       | -2,52       | 1,95           | -0,77       | 0,00        |
|                                  | UL 30            | -2,80         | -1,79       | -2,54       | -2,50            | -1,97       | -2,52       | ---            | ---         | ---         |
|                                  | UL 31            | -2,80         | -1,79       | -2,54       | -2,50            | -1,97       | -2,52       | ---            | ---         | ---         |
| Perfil Transversal das vertentes | PTV1             | <b>0,17</b>   | <b>0,22</b> | <b>0,29</b> | <b>0,18</b>      | <b>0,23</b> | <b>0,27</b> | -0,03          | <b>0,11</b> | -0,50       |
|                                  | PTV2             | -1,43         | -2,28       | -1,75       | -0,83            | -0,58       | -0,99       | -0,90          | -0,13       | -0,50       |
|                                  | PTV3             | -0,17         | -0,23       | -0,34       | -0,18            | -0,26       | -0,32       | <b>0,05</b>    | -0,13       | <b>0,39</b> |

| Condicionantes | Código /<br>Classes | Total da ilha |             |             | Interior da ilha |             |             | Faixa costeira |             |             |
|----------------|---------------------|---------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
|                |                     | >100          | >500        | >1000       | >100             | >500        | >1000       | >100           | >500        | >1000       |
| Solos          | S1                  | -0,10         | -0,20       | -0,41       | -0,05            | -0,20       | -0,45       | 1,24           | 2,03        | 2,71        |
|                | S2                  | -3,73         | -1,88       | -1,72       | -2,96            | -1,87       | -1,60       | -1,59          | -0,61       | -1,51       |
|                | S3                  | -3,73         | -1,88       | -1,72       | -2,96            | -1,87       | -1,60       | -1,59          | -0,61       | -1,51       |
|                | S4                  | -3,73         | -1,88       | -1,72       | -2,96            | -1,87       | -1,60       | ---            | ---         | ---         |
|                | S5                  | -1,44         | -1,88       | -1,72       | -2,77            | -1,87       | -1,60       | -1,59          | -0,61       | -1,51       |
|                | S6                  | 0,51          | 0,78        | 1,05        | 0,19             | 0,55        | 0,76        | <b>2,98</b>    | <b>3,92</b> | <b>4,39</b> |
|                | S7                  | -3,73         | -1,88       | -1,72       | -2,96            | -1,87       | -1,60       | -1,59          | -0,61       | -1,51       |
|                | S8                  | -1,23         | -1,60       | -1,72       | -1,84            | -1,77       | -1,60       | 1,73           | 1,33        | -1,51       |
|                | S9                  | -3,73         | -1,88       | -1,72       | -2,96            | -1,87       | -1,60       | -1,59          | -0,61       | -1,51       |
|                | S10                 | -3,73         | -1,88       | -1,72       | -2,96            | -1,87       | -1,60       | -1,59          | -0,61       | -1,51       |
|                | S11                 | -3,73         | -1,88       | -1,72       | -2,96            | -1,87       | -1,60       | -1,59          | -0,61       | -1,51       |
|                | S12                 | -1,30         | -1,33       | -1,22       | -1,35            | -1,49       | -1,38       | -1,31          | -0,61       | -0,71       |
|                | S13                 | -3,73         | -1,88       | -1,72       | -2,96            | -1,87       | -1,60       | -1,59          | -0,61       | -1,51       |
|                | S14                 | 0,36          | 0,36        | 0,37        | 0,37             | 0,38        | 0,39        | 0,66           | -0,61       | -1,51       |
|                | S15                 | <b>0,59</b>   | <b>0,85</b> | <b>1,16</b> | <b>0,63</b>      | <b>1,14</b> | <b>1,57</b> | -0,25          | -0,26       | -0,95       |
|                | S16                 | -1,88         | -1,88       | -1,72       | -1,90            | -1,87       | -1,60       | ---            | ---         | ---         |
|                | S17                 | -3,73         | -1,88       | -1,72       | -2,96            | -1,87       | -1,60       | -1,59          | -0,61       | -1,51       |
|                | S18                 | -3,73         | -1,88       | -1,72       | -2,96            | -1,87       | -1,60       | -1,59          | -0,61       | -1,51       |

## 4.2.A SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS

Para a elaboração do modelo de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos, recorreu-se ao método do Valor Informativo, tal como referido no ponto 4.1. O valor da suscetibilidade para cada unidade de terreno  $j$ , é calculado através do somatório de todos os VI de cada condicionante, por meio da equação:

$$l_j = \sum_{i=0}^m X_{ij} \times l_i$$

Onde:

$l_j$  = Valor Informativo da unidade de terreno;

$m$  = nº de condicionantes;

$X_{ij}$  = 1 ou 0, consoante a condicionante  $X_i$  está ou não presente na célula  $j$ ;

$l_i$  = Valor Informativo da condicionante.

Do processo de cálculo e integração dos valores explicitados anteriormente, resultaram os nove mapas de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na ilha da Madeira (Figura 4-1 a Figura 4-9). As unidades de terreno com VI positivo indicam maior suscetibilidade para a ocorrência de deslizamentos, a qual é tanto mais elevada quanto maior for o valor do VI; os valores negativos indicam fraca suscetibilidade para a ocorrência de deslizamentos, a qual é tanto menor quanto menor for o valor do VI (Garcia, 2012).

Importa ainda referir que a legenda está definida em função dos valores máximos e mínimos de cada mapa, não sendo por isso possível a comparação direta entre eles, visto que a mesma intensidade de cor, assume valores diferentes de suscetibilidade em cada um dos mapas.



Figura 4-1 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 100 m<sup>2</sup> para a totalidade da ilha a Madeira.



Figura 4-2 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 500 m<sup>2</sup> para a totalidade da ilha da Madeira.



Figura 4-3 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 1000 m<sup>2</sup> para a totalidade da ilha da Madeira.



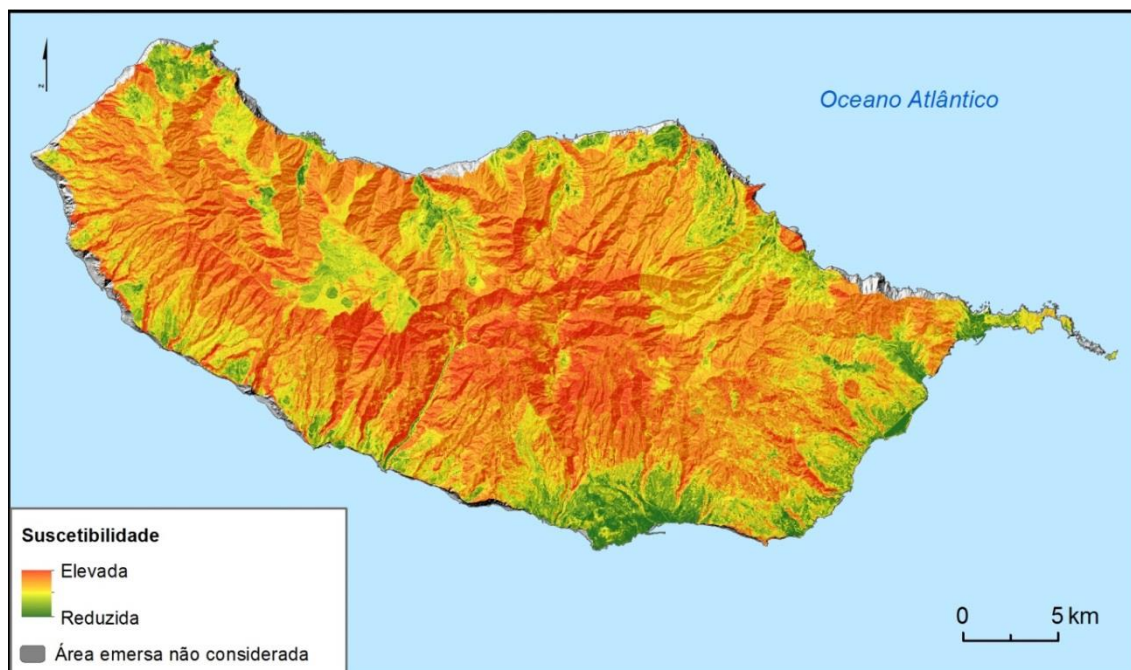


Figura 4-4 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 100 m<sup>2</sup> para o interior da ilha da Madeira.

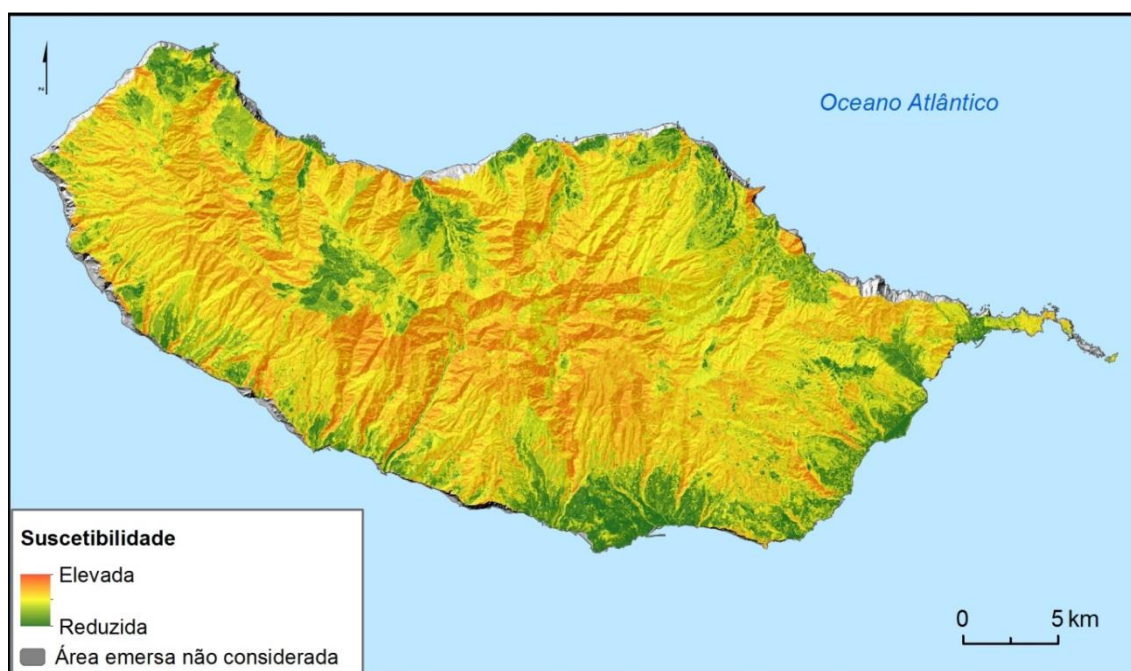


Figura 4-5 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 500 m<sup>2</sup> para o interior da ilha da Madeira.

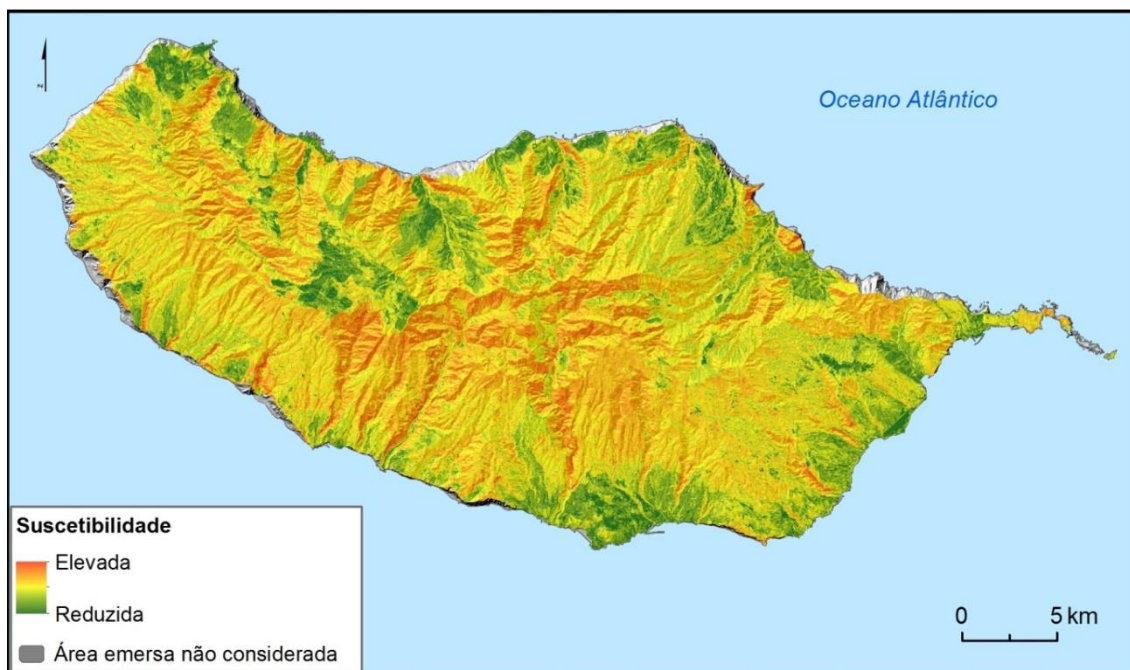


Figura 4-6 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 1000 m<sup>2</sup> para o interior da ilha da Madeira.



Figura 4-7 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 100 m<sup>2</sup> para a faixa costeira da ilha da Madeira.



Figura 4-8 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 500 m<sup>2</sup> para a faixa costeira da ilha da Madeira.

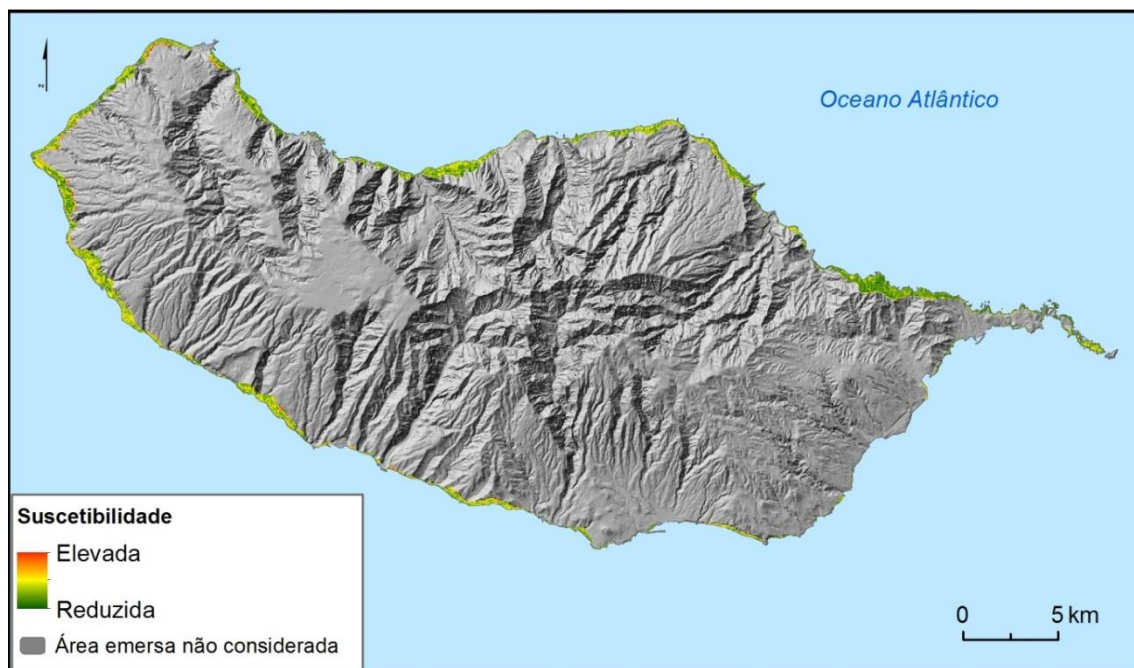


Figura 4-9 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superiores a 1000 m<sup>2</sup> para a faixa costeira da ilha da Madeira.



### 4.3. VALIDAÇÃO DOS MAPAS DE SUSCETIBILIDADE

Segundo Frattini *et al.* (2010), um modelo para ser considerado aceitável deve cumprir, pelo menos três critérios: (i) adequabilidade (conceitual e matemática) em descrever o comportamento do sistema natural; (ii) robustez a pequenas alterações nos dados de base; e (iii) exatidão da previsão dos dados registrados.

De acordo com Zêzere *et al.* (2004), os mapas de suscetibilidade devem ser validados a fim de avaliar o seu poder preditivo em relação a deslizamentos futuros, sob pena de serem considerados inúteis e sem fundamento científico. Neste contexto, Soeters e van Westen (1996) defendem que a capacidade preditiva de um mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente pode ser efetuada quando se observarem futuros deslizamentos (procedimento “esperar para ver”). De acordo com Guzzetti *et al.* (1999) e Chung e Fabbri (2003) esta é a única maneira para a validação da predição de futuros deslizamentos. Contudo, é necessário avaliar a fiabilidade e robustez de um modelo de suscetibilidade em tempo útil, antes da sua utilização.

Chung e Fabbri (2003) defendem que é possível determinar a capacidade preditiva do modelo em relação a deslizamentos futuros, fazendo-se uma partição do inventário em dois conjuntos, sendo um utilizado para modelar e outro para validar. Para a partição dos deslizamentos podem ser usadas 3 técnicas (Pereira, 2009):

- Partição temporal, pressupondo que haja informação relativa à data dos deslizamentos, que consiste em estipular uma data onde e a partir da qual é feita a partição;
- Partição espacial, que consiste na divisão da área de estudo em duas subáreas não sobrepostas; no entanto, segundo Carrara *et al.* (2008), esta técnica de partição não é muito fiável porque os fatores condicionantes, geologia, ocupação do solo, declives, etc. podem não ser os mesmos em ambos os conjuntos, alterando por isso a suscetibilidade de deslizamentos;
- Partição aleatória, que consiste em dividir de forma aleatória os deslizamentos em dois grupos, devendo contudo garantir-se uma distribuição espacial semelhante das áreas instabilizadas em ambos os conjuntos; isto implica uma análise mais cuidada das taxas de predição obtidas por modelos resultantes desta técnica de partição (Pereira, 2009).

Neste estudo optou-se pela técnica de partição aleatória, uma vez que a área de estudo não é homogênea e também porque não há registos cronológicos para todas as áreas deslizadas.

Assim, a partição aleatória foi realizada automaticamente através do ArcGIS 10.1 nas proporções, 60% e 40%.



Figura 4-10 - Distribuição dos deslizamentos utilizados na modelação (60%) e na validação (40%).

#### 4.4. CAPACIDADE PREDITIVA DOS MODELOS

A avaliação da capacidade preditiva deste modelo de suscetibilidade teve por base o proposto em Chung e Fabbri (1999) que relaciona a área de estudo representada numa escala decrescente de suscetibilidade e os deslizamentos justificados em cada fração dessa escala. Neste contexto, a validação dos resultados é executada através do cruzamento entre o mapa de suscetibilidade com valores contínuos e o mapa da distribuição espacial dos deslizamentos.

Dependendo do conjunto de deslizamentos utilizado para a validação, obtém-se uma taxa de sucesso ou uma taxa de predição. Assim, a taxa de sucesso é determinada utilizando na validação o mesmo conjunto de deslizamentos utilizado no cruzamento com o mapa de suscetibilidade. Já a taxa de predição utiliza na validação um conjunto

de deslizamentos independente do que foi usado no cruzamento com o mapa de suscetibilidade.

Este procedimento permite assim, aferir o grau de ajuste do modelo aos dados de entrada, sendo expectável que os valores da taxa de sucesso sejam superiores aos da taxa de predição, uma vez que os deslizamentos usados na validação e na modelação são os mesmos.

Esta análise pode ser representada graficamente através de uma curva de validação (sucesso ou de predição), que representa o valor percentual acumulado de deslizamentos de terra na amostra de validação (eixo y) em relação à suscetibilidade expressa de forma decrescente no eixo x. As curvas de validação são obtidas por comparação entre os valores de suscetibilidade e as áreas deslizadas. Imaginando que a curva de validação coincide com a diagonal de 0 a 1, seria equivalente a uma previsão totalmente aleatória (Remondo *et al.*, 2003; Frattini *et al.*, 2010). Assim sendo, quanto mais para cima a curva se afastar da diagonal, melhor será o grau de ajuste dos dados ao modelo. De igual modo, quanto maior for o gradiente da primeira parte da curva, maior será a sua capacidade de previsão (Remondo *et al.*, 2003; Chung e Fabbri, 2003).

O recurso ao cálculo da área abaixo da curva (AAC) permite avaliar com mais pormenor a qualidade das taxas de sucesso e de predição (Zêzere *et al.*, 2008; Carrara *et al.*, 2008; Frattini *et al.*, 2010), sendo o seu cálculo obtido através da seguinte fórmula:

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[ (Ls_i - li_i) \times \frac{(a_i + b_i)}{2} \right]$$

Sendo que:

- $Ls_i$  é o valor superior do intervalo (abcissas)
- $li_i$  é o valor inferior do intervalo (abcissas)
- $a_i$  é o valor da ordenada correspondente a  $li_i$
- $b_i$  é o valor da ordenada correspondente a  $Ls_i$
- $i$  é O número de intervalos de valor ou número da classe.

Os valores de uma AAC podem variar entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 melhor será a capacidade preditiva do modelo. Um valor de AAC de 0,5 reflete uma capacidade preditiva casual do fenómeno, com representação gráfica nas linhas retas diagonais como referido anteriormente.

Neste caso, para aferir a qualidade do modelo consideraram-se os parâmetros propostos por Guzzetti *et al.* (2006), por serem também eles utilizados em deslizamentos. Assim, o autor defende que um valor de AAC por volta dos 0,75 já é satisfatório, superior a 0,80 é considerado muito satisfatório, e 0,9 ou superior é considerado extremamente satisfatório e significa que o modelo acerta com grande qualidade o inventário das áreas deslizadas.

As Figura 4-11 a Figura 4-13, mostram os gráficos com as respectivas curvas de sucesso e de predição para as 3 áreas de estudo (interior, faixa costeira e a totalidade de ilha) onde foram utilizados, quer para modelar quer para validar, 3 grupos de deslizamentos tendo em conta a área deslizada ( $> 100 \text{ m}^2$ ,  $> 500 \text{ m}^2$  e  $> 1000 \text{ m}^2$ ).

Não foi considerada a taxa de predição para os deslizamentos com área  $> 1000 \text{ m}^2$  ocorridos na faixa costeira, por não existirem deslizamentos em número suficiente para executar uma partição do inventário que garantir-se uma distribuição espacial semelhante das áreas instabilizadas em ambos os conjuntos.

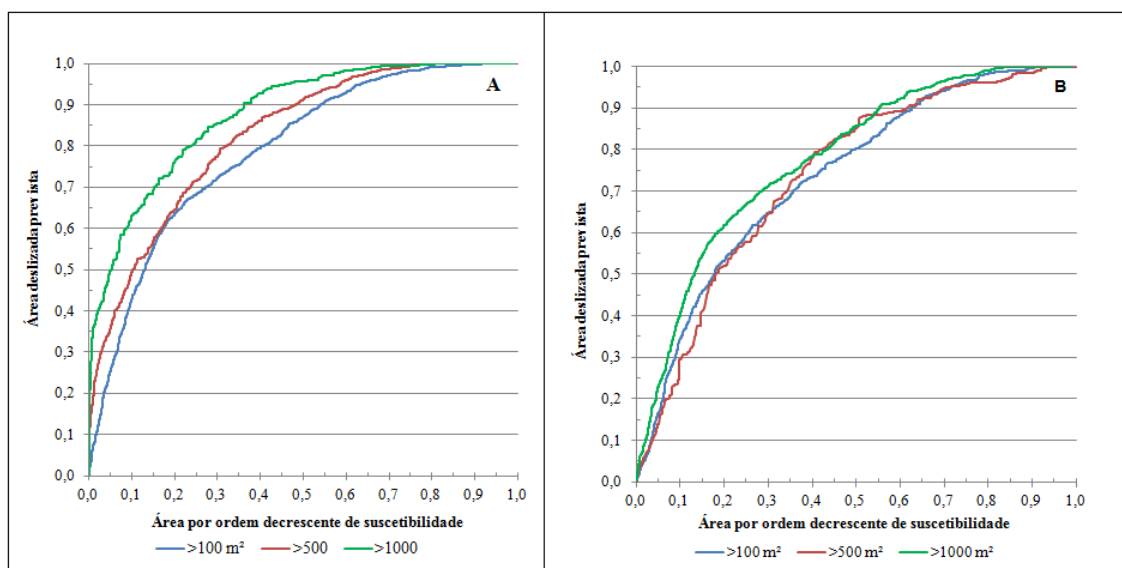


Figura 4-11 - Curvas de sucesso (A) e de predição (B) dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos corridos com os três grupos de deslizamentos, aplicado à totalidade da ilha da Madeira.

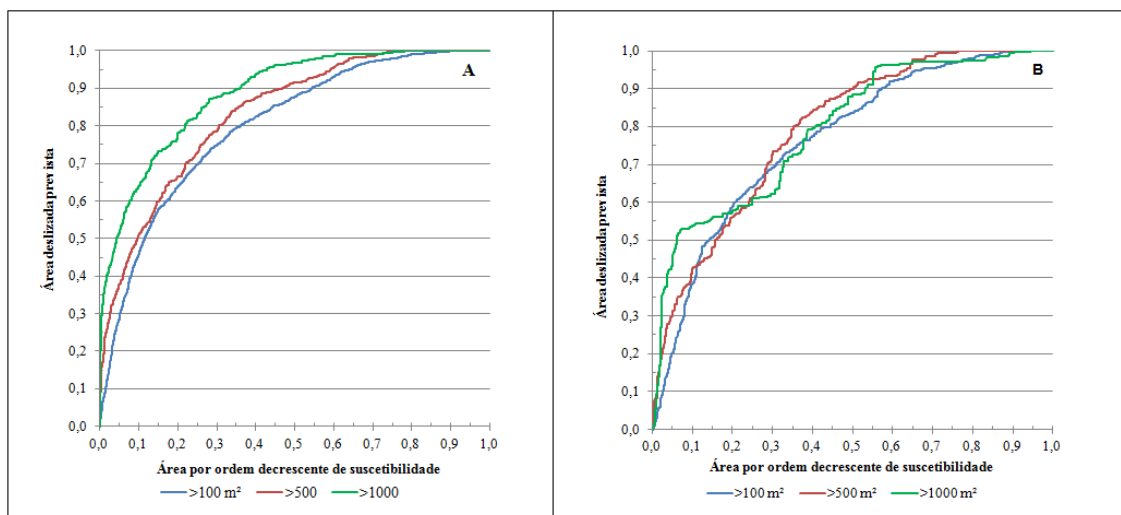


Figura 4-12 - Curvas de sucesso (A) e de predição (B) dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos corridos com os três grupos de deslizamentos, aplicado ao interior da ilha da Madeira.

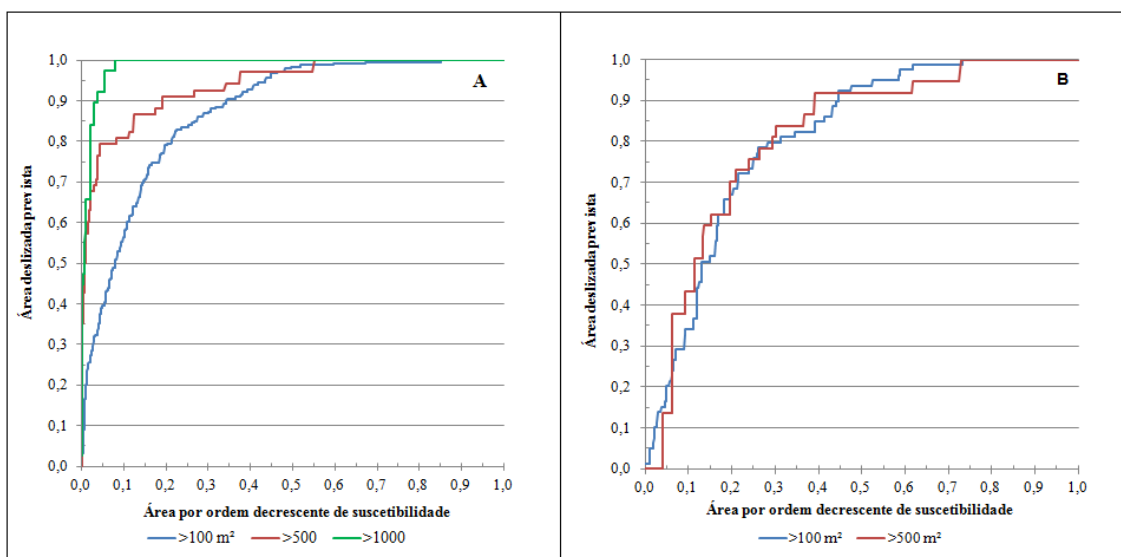


Figura 4-13 - Curvas de sucesso (A) e de predição (B) dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos corridos com os três grupos de deslizamentos, aplicado à faixa costeira da ilha da Madeira.

O Quadro 4.2 indica os valores de AAC das taxas de sucesso e de predição para cada área de análise, tendo em conta a utilização de deslizamentos inseridos nos 3 limites de área considerados. Como se constata, os valores das AAC vão aumentando à medida que a análise é efetuada com menor número de deslizamentos, mas com maior área. Os resultados são igualmente superiores quando se analisa a suscetibilidade da ilha da Madeira separando os deslizamentos ocorridos no interior daqueles que ocorrem na



faixa costeira, quando comparados com os que se obtêm se for considerada a totalidade da ilha.

Quadro 4.2 - Grau de ajuste (AAC) dos resultados dos modelos aos deslizamentos registrados, tendo em conta cada grupo de deslizamentos, para cada área de estudo.

| Área de estudo | Taxa de sucesso      |                      |                       | Taxa de predição     |                      |                       |
|----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
|                | > 100 m <sup>2</sup> | > 500 m <sup>2</sup> | > 1000 m <sup>2</sup> | > 100 m <sup>2</sup> | > 500 m <sup>2</sup> | > 1000 m <sup>2</sup> |
| Área Total     | 0,789                | 0,824                | 0,877                 | 0,737                | 0,739                | 0,779                 |
| Interior       | 0,800                | 0,831                | 0,886                 | 0,765                | 0,792                | 0,794                 |
| Faixa costeira | 0,873                | 0,939                | 0,987                 | 0,810                | 0,812                | ---                   |

No entanto, Chung e Fabbri (2008) referem que os valores das AAC tendem a aumentar com a redução do número de deslizamentos considerados no modelo. Neste contexto, Oliveira (2012) defende que o valor de AAC=1 nunca será alcançado numa curva de sucesso ou de predição, uma vez que esse valor depende do valor global da área deslizada utilizada na validação de cada modelo de suscetibilidade.

A Figura 4-14 indica a representação gráfica de uma curva de validação, bem como a quantificação dos respectivos valores de AAC obtidos tendo em conta diferentes valores de áreas deslizadas na totalidade da área de estudo.

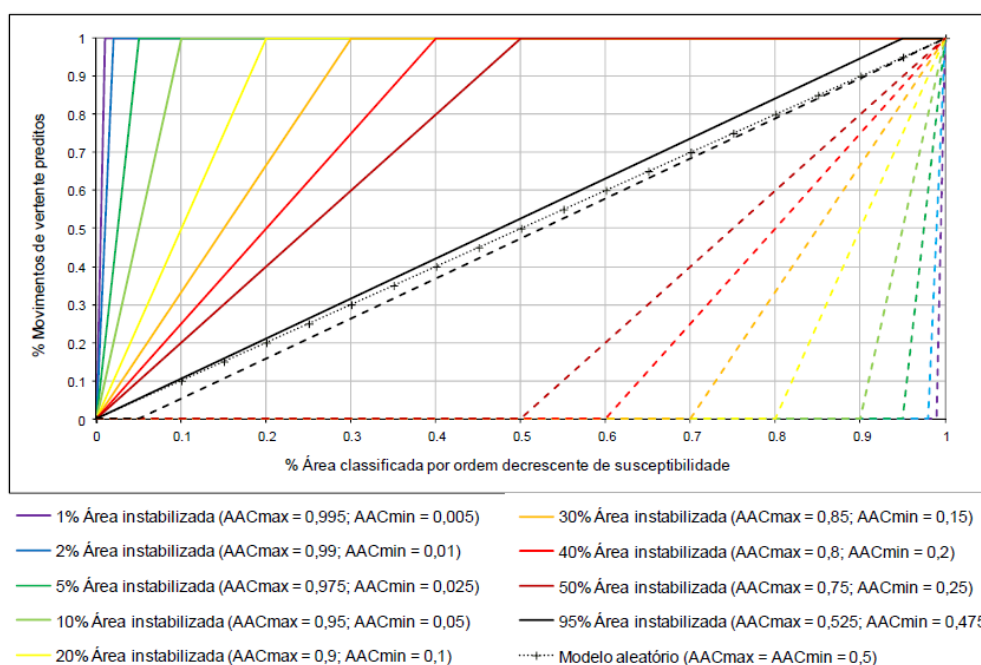


Figura 4-14 - Demonstração gráfica da curva de sucesso/predição e quantificação dos respectivos valores de AAC determinados em função de diferentes valores de área instabilizada no contexto da totalidade da área de estudo. Fonte: Oliveira (2012)

Como se pode observar no Quadro 4.3, a percentagem de área deslizada em cada área de estudo é muito baixa, ou seja, 0,11% no maior dos casos. Com estes valores percentuais tão baixos, os valores de AAC mínimos e máximos que matematicamente se podem obter, são muito próximos dos limites (0 e 1). Isto significa que nenhum dos valores de AAC, resultantes do modelo de validação utilizado, foi condicionado pela relação entre área de estudo e a área deslizada.

Quadro 4.3 - Valores de AAC máximos e mínimos, consoante a percentagem de área deslizada, tendo em conta cada grupo de deslizamentos e área de estudo.

| Área de estudo          | Deslizamentos considerados (m <sup>2</sup> ) | % Área deslizada | AAC Máximo | AAC Mínimo |
|-------------------------|--|------------------|------------|------------|
| <b>Área Total</b>       | >100   | 0,05             | 0,9998     | 0,00024    |
|                         | >500   | 0,02             | 0,9999     | 0,00011    |
|                         | >1000  | 0,01             | 0,9999     | 0,00007    |
| <b>Interior da ilha</b> | >100   | 0,04             | 0,9998     | 0,00012    |
|                         | >500   | 0,02             | 0,9999     | 0,00005    |
|                         | >1000  | 0,01             | 0,9999     | 0,00004    |
| <b>Faixa costeira</b>   | >100   | 0,11             | 0,9995     | 0,0005     |
|                         | >500   | 0,03             | 0,9998     | 0,0002     |

Com o intuito de avaliar em que medida o modelo geral consegue prever os deslizamentos da faixa costeira, foram efetuadas 3 validações (Figura 4-15), uma com cada um dos grupos de deslizamentos (> 100 m<sup>2</sup>, > 500 m<sup>2</sup> e > 1000 m<sup>2</sup>), sendo a área de estudo a totalidade da ilha da Madeira. Para modelar utilizaram-se os deslizamentos ocorridos no interior e para validar os deslizamentos ocorridos na faixa costeira.

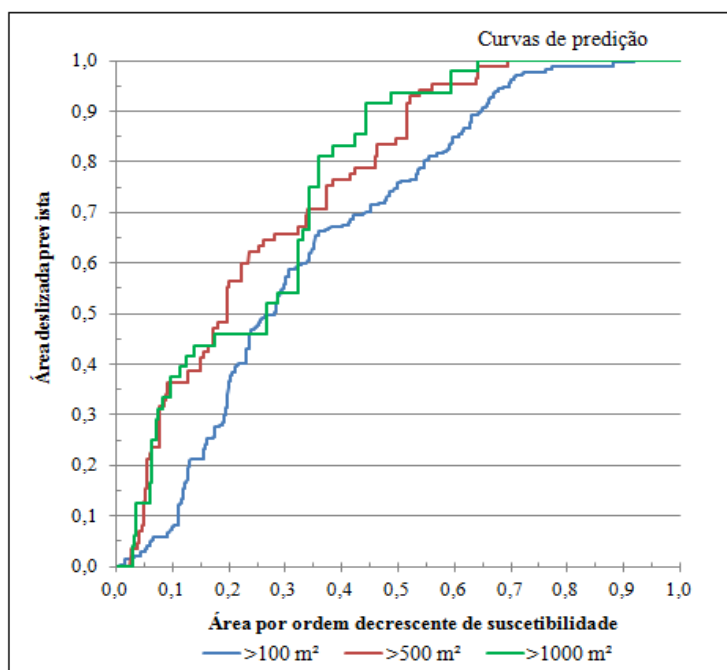


Figura 4-15 - Curvas de predição dos modelos de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos: modelação com os deslizamentos do Interior da Ilha e validação com os deslizamentos da Faixa Costeira.

Como se pode observar no Quadro 4.4, quando se corre o modelo de validação com os deslizamentos  $> 100 \text{ m}^2$ , isto é, com todos os deslizamentos, o valor 0,67 alcançado de AAC, não é sequer considerado satisfatório. Quando se corre o modelo com áreas deslizadas superiores a  $500 \text{ m}^2$  e a  $>1000 \text{ m}^2$ , os valores de AAC obtidos encontram-se no limiar do satisfatório (0,76). Em quaisquer dos casos, os valores de AAC são bastante inferiores, quando os modelos são construídos apenas com base nas ocorrências da faixa costeira.

Pode-se, desta forma, concluir que os deslizamentos ocorridos na faixa costeira têm dinâmicas próprias, parcialmente diferentes daquelas que despontam os deslizamentos ocorridos no resto da ilha.

Quadro 4.4 - Qualidade preditiva (AAC) dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos, tendo em conta a área interior da ilha para modelar e a faixa costeira para validar.

| Grupos de deslizamentos | $> 100 \text{ m}^2$ | $> 500 \text{ m}^2$ | $> 1000 \text{ m}^2$ |
|-------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| AAC                     | 0,67                | 0,76                | 0,76                 |

#### **4.5. CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS DE SUSCETIBILIDADE**

Com vista a proporcionar uma melhor leitura e interpretação dos mapas de suscetibilidade, é necessário proceder à sua classificação. De acordo com Garcia (2002) e Garcia *et al.* (2007), o mesmo modelo de suscetibilidade, classificado com métodos diferentes, pode resultar em mapas muito divergentes.

Neste estudo optou-se pela classificação expressa nos mapas de suscetibilidade através de uma escala qualitativa com 5 classes, tendo como referência a realidade da área de estudo: 1– Nula ou muito reduzida; 2– Reduzida; 3– Moderada; 4– Elevada; 5– Muito elevada.

A classificação foi efetuada com recurso às quebras naturais das curvas de sucesso em detrimento das curvas de predição, por serem as que apresentam melhores resultados, exceto a classe “nula ou muito reduzida” que foi obtida através do cruzamento do mapa de suscetibilidade com os deslizamentos, tendo como limite o *score* do Valor Informativo, a partir do qual não se registam quaisquer deslizamentos.

Assim, neste sentido, foi efetuada a classificação dos mapas de suscetibilidade, tendo em conta 3 setores da ilha da Madeira: (a) totalidade da Ilha; (b) interior da Ilha; (c) faixa costeira.

a) A totalidade da ilha da Madeira

A Figura 4-16 mostra as quebras naturais das curvas de sucesso utilizadas na classificação dos mapas de suscetibilidade elaborados tendo em conta a totalidade da ilha da Madeira com os diferentes grupos de deslizamentos.

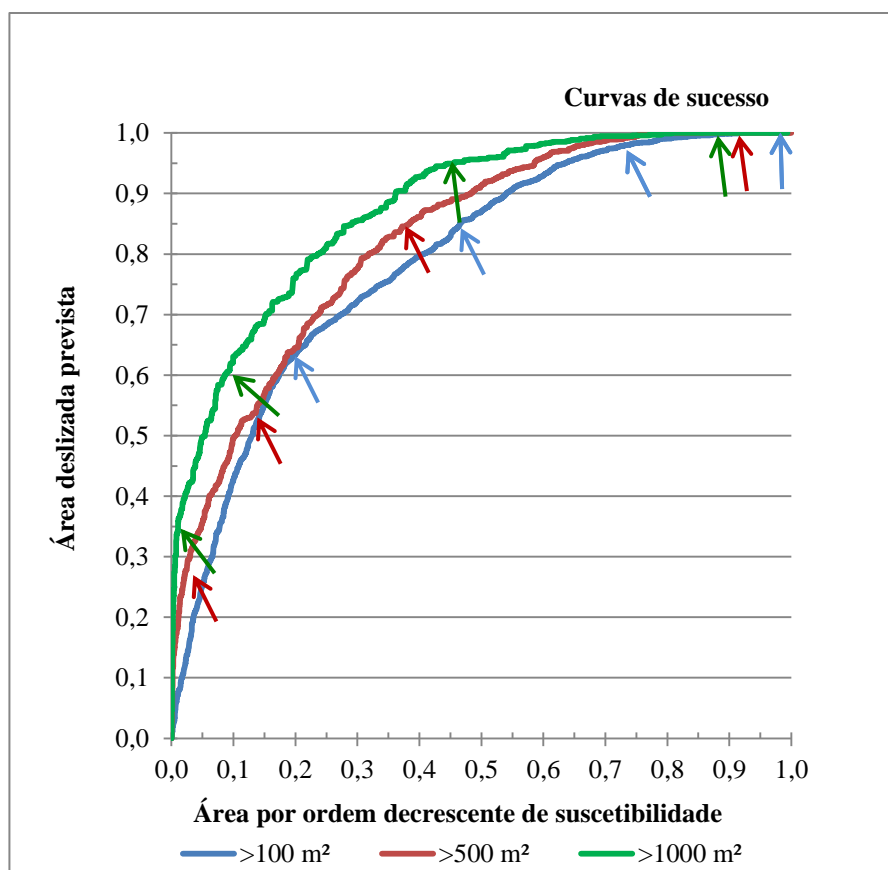


Figura 4-16 - Identificação das classes de suscetibilidade a deslizamentos para a totalidade de ilha da Madeira, tendo em conta as quebras naturais das curvas de sucesso.

O Quadro 4.5 indica o intervalo dos *scores* do VI dos mapas de suscetibilidade, bem como os limites das classes de suscetibilidade, tendo em conta os 3 grupos de deslizamentos e a área total da ilha.

Assim, as unidades de terreno onde a probabilidade de ocorrência de deslizamentos é menor são aquelas cujos valores de VI são -15,35, -14,44 e -17,08 para os modelos corridos com áreas deslizadas superiores a 100 m<sup>2</sup>, 500 m<sup>2</sup> e 1000 m<sup>2</sup>, respetivamente. No lado oposto, as unidades de terreno com maior probabilidade de deslizarem são aquelas cujos valores de VI são 5,07, 5,49 e 5,98, igualmente tendo em conta as áreas deslizadas superiores a 100 m<sup>2</sup>, 500 m<sup>2</sup> e 1000 m<sup>2</sup>, respetivamente.

Quadro 4.5 - Valores de VI utilizados na delimitação das classes de suscetibilidade para a totalidade da ilha da Madeira.

| Área Total                |      |       |                           |      |       |                           |      |       |
|---------------------------|------|-------|---------------------------|------|-------|---------------------------|------|-------|
| >100 m <sup>2</sup>       |      |       | >500 m <sup>2</sup>       |      |       | >1000 m <sup>2</sup>      |      |       |
| Intervalo [-15,34 - 5,07] |      |       | Intervalo [-14,44 - 5,49] |      |       | Intervalo [-17,08 - 5,98] |      |       |
| AEA                       | ADA  | VI    | AEA                       | ADA  | VI    | AEA                       | ADA  | VI    |
| 0,92                      | 1,00 | -5,97 | 0,86                      | 1,00 | -4,90 | 0,81                      | 1,00 | -5,08 |
| 0,62                      | 0,95 | -1,46 | 0,35                      | 0,83 | -0,14 | 0,43                      | 0,95 | -1,27 |
| 0,45                      | 0,83 | -0,28 | 0,11                      | 0,52 | 1,25  | 0,08                      | 0,58 | 1,49  |
| 0,19                      | 0,63 | 0,82  | 0,03                      | 0,32 | 2,08  | 0,01                      | 0,36 | 2,90  |
| 0,38                      | 0,78 | 0,00  | 0,32                      | 0,80 | 0,00  | 0,25                      | 0,81 | 0,00  |

Área de Estudo Acumulada (AEA); Área Deslizada Acumulada (ADA).

Ao relacionar-se o mapa de suscetibilidade classificado com as áreas deslizadas (Quadro 4.6), verifica-se que, no caso do modelo corrido com todos os deslizamentos (Figura 4-17), a classe de suscetibilidade muito elevada representa 19,3 % do total da área de estudo e contém 62,6 % do total da área deslizada. Contudo, ao relacionar-se a área dessa classe com a área deslizada nessa mesma classe, verifica-se que a probabilidade de se encontrar áreas deslizadas é de 0,152. A classe elevada compreende 24,9 % da área de estudo e 19,7 % da área deslizada, sendo que a probabilidade de se encontrar áreas deslizadas na classe é de 0,037. A parcela de território onde não se registou qualquer deslizamento é de apenas 8,3 % da área de estudo.

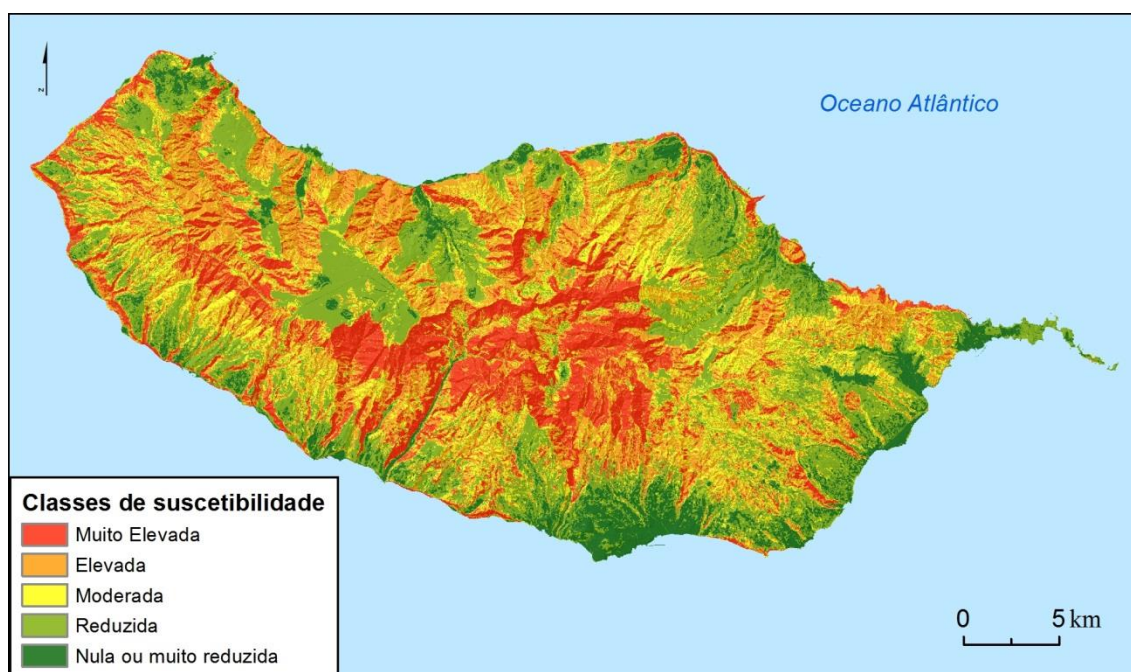


Figura 4-17 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na totalidade da ilha da Madeira, para áreas deslizadas superiores a 100 m<sup>2</sup>.

No mapa de suscetibilidade elaborado com os deslizamentos cujas áreas são superiores a 500 m<sup>2</sup> (Figura 4-18), verifica-se que a classe de suscetibilidade muito elevada representa 3,7 % do total da área de estudo e contem 32,5 % do total da área deslizada, sendo a probabilidade de se encontrar áreas deslizadas na classe é de 0,20 %. A classe elevada ocupa 7,6 % da área de estudo e 19,8 % da área deslizada, onde a probabilidade de se encontrar áreas deslizadas na classe é de 0,06 %. A parcela de território onde não se registou qualquer deslizamento é de 14,06 % da área de estudo.

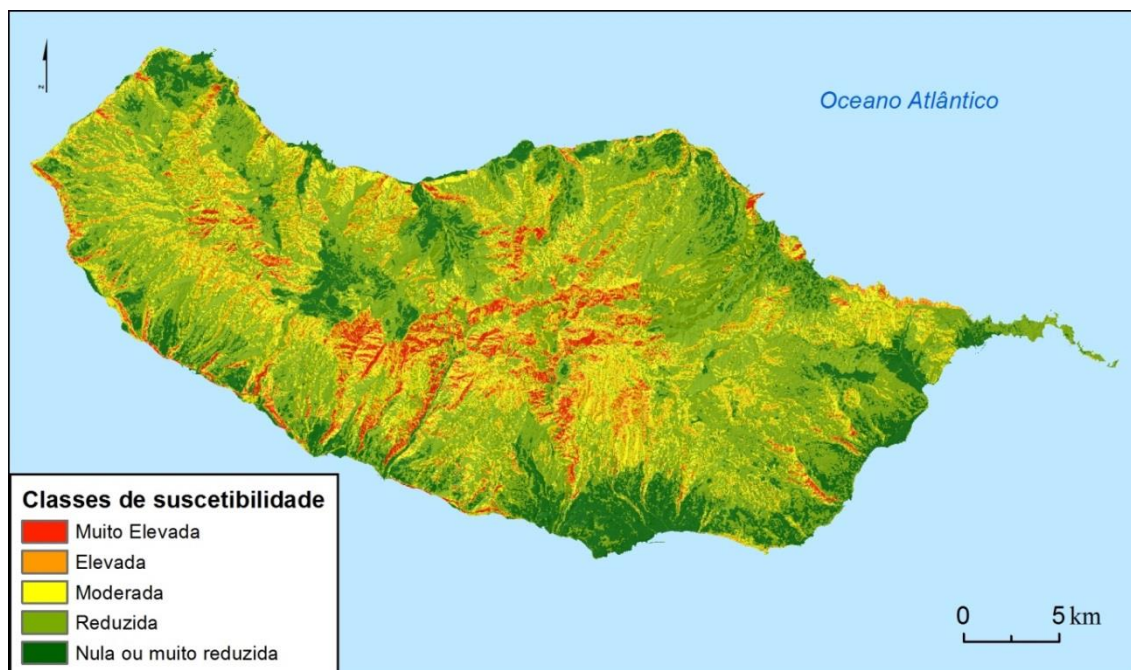


Figura 4-18 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na totalidade da ilha da Madeira, para áreas deslizadas superiores a 500 m<sup>2</sup>.

No caso do mapa de suscetibilidade elaborado com os deslizamentos cujas áreas são superiores a 1000 m<sup>2</sup> (Figura 4-19), verifica-se que a classe de suscetibilidade muito elevada corresponde apenas a 1,1 % do total da área de estudo e contém 35,4 % do total da área deslizada, sendo a probabilidade de se encontrar áreas deslizadas na classe de 0,43 %. A classe elevada representa 6,3 % da área de estudo e 22,2 % da área deslizada, onde a probabilidade de se encontrar áreas deslizadas na classe é de 0,046. A parcela de território onde não se registou qualquer deslizamento é de 18,5 % da área de estudo.





Figura 4-19 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na totalidade da ilha da Madeira, para áreas deslizadas superiores a 1000 m<sup>2</sup>.

Quadro 4.6 - Frequência relativa (%) da área da classe e área deslizada, face à totalidade da área de estudo, e a probabilidade condicionada de área deslizada por classe de suscetibilidade.

| Classes de suscetibilidade | Área Total                        |                    |             |                                   |                    |             |                                    |                    |             |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------|-----------------------------------|--------------------|-------------|------------------------------------|--------------------|-------------|
|                            | Deslizamentos > 100m <sup>2</sup> |                    |             | Deslizamentos > 500m <sup>2</sup> |                    |             | Deslizamentos > 1000m <sup>2</sup> |                    |             |
|                            | Área da classe (%)                | Área deslizada (%) | Prob. cond. | Área da classe (%)                | Área deslizada (%) | Prob. cond. | Área da classe (%)                 | Área deslizada (%) | Prob. cond. |
| Nula ou muito reduzida     | 8,3                               | 0,0                | 0,000       | 14,06                             | 0,00               | 0,00        | 18,5                               | 0,0                | 0,000       |
| Reduzida                   | 18,5                              | 2,0                | 0,005       | 51,01                             | 17,25              | 0,01        | 38,7                               | 5,5                | 0,002       |
| Moderada                   | 29,0                              | 15,7               | 0,025       | 23,65                             | 30,47              | 0,03        | 35,4                               | 36,9               | 0,014       |
| Elevada                    | 24,9                              | 19,7               | 0,037       | 7,63                              | 19,80              | 0,06        | 6,3                                | 22,2               | 0,046       |
| Muito elevada              | 19,3                              | 62,6               | 0,152       | 3,66                              | 32,48              | 0,20        | 1,1                                | 35,4               | 0,432       |



## b) O setor interior da ilha da Madeira

A Figura 4-20 mostra as quebras naturais das curvas de sucesso utilizadas na classificação dos mapas de suscetibilidade elaborados para o interior da ilha da Madeira com os diferentes grupos de deslizamentos.

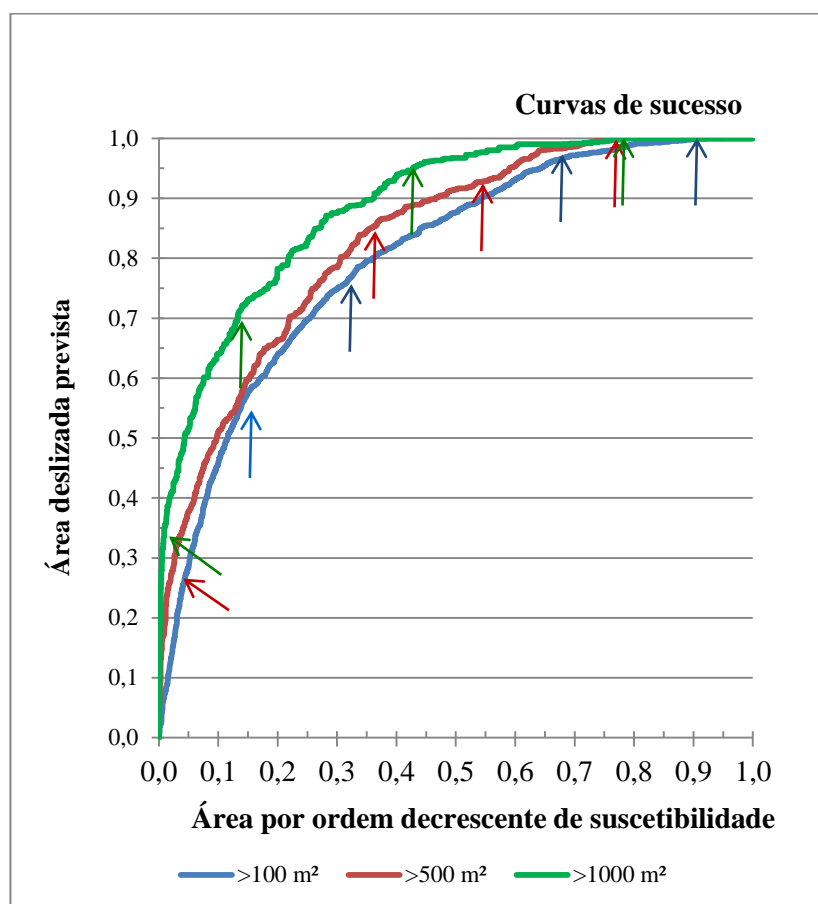


Figura 4-20 - Delimitação das classes de suscetibilidade a deslizamentos para o interior da ilha, tendo em conta as quebras naturais das curvas de sucesso.

O Quadro 4.7 indica o intervalo dos *scores* do VI dos mapas de suscetibilidade, bem como os limites das classes de suscetibilidade, tendo em conta os 3 grupos de deslizamentos e a área interior da ilha. O quadro mostra igualmente a porção de área de estudo acumulada e de deslizamentos preditos onde o VI é 0.

Assim, as unidades de terreno onde a probabilidade de ocorrência de deslizamentos é menor são aquelas cujos valores de VI são: -13,93; -14,65 e -15,52, para os modelos corridos com áreas deslizadas superiores a 100 m<sup>2</sup>; 500 m<sup>2</sup> e 1000 m<sup>2</sup>, respetivamente. As unidades de terreno com maior probabilidade de deslizarem são aquelas cujos

valores de VI são: 4,62; 5,54 e 6,71, igualmente tendo em conta as áreas deslizadas superiores a 100 m<sup>2</sup>, 500 m<sup>2</sup> e 1000 m<sup>2</sup>, respetivamente.

Quadro 4.7 - Valores de VI utilizados na delimitação das classes de suscetibilidade.

| Área interior da ilha     |      |       |                           |      |       |                           |      |       |
|---------------------------|------|-------|---------------------------|------|-------|---------------------------|------|-------|
| >100 m <sup>2</sup>       |      |       | >500 m <sup>2</sup>       |      |       | >1000 m <sup>2</sup>      |      |       |
| Intervalo [-13,93 - 4,62] |      |       | Intervalo [-14,65 - 5,54] |      |       | Intervalo [-15,52 - 6,71] |      |       |
| AEA                       | ADA  | VI    | AEA                       | ADA  | VI    | AEA                       | ADA  | VI    |
| 0,93                      | 1,00 | -6,39 | 0,77                      | 1,00 | -3,60 | 0,78                      | 1,00 | -4,67 |
| 0,67                      | 0,96 | -1,98 | 0,57                      | 0,93 | -1,55 | 0,44                      | 0,96 | -1,57 |
| 0,32                      | 0,77 | 0,19  | 0,35                      | 0,84 | -0,26 | 0,14                      | 0,72 | 0,78  |
| 0,14                      | 0,55 | 1,19  | 0,03                      | 0,31 | 2,39  | 0,01                      | 0,37 | 3,03  |
| 0,36                      | 0,80 | 0,00  | 0,31                      | 0,80 | 0,00  | 0,23                      | 0,82 | 0,00  |

Área de Estudo Acumulada (AEA); Área Deslizada Acumulada (ADA).

No caso da suscetibilidade a deslizamentos para o interior da ilha decorrente do modelo corrido com todos os deslizamentos (Figura 4-21) a classe de suscetibilidade muito elevada representa 14,7 % do total da área de estudo e contem 54,7 % do total da área deslizada. Ao relacionar-se a área dessa classe com a área deslizada nessa mesma classe, verifica-se que a probabilidade de se encontrar áreas deslizadas é de 0,18 %.

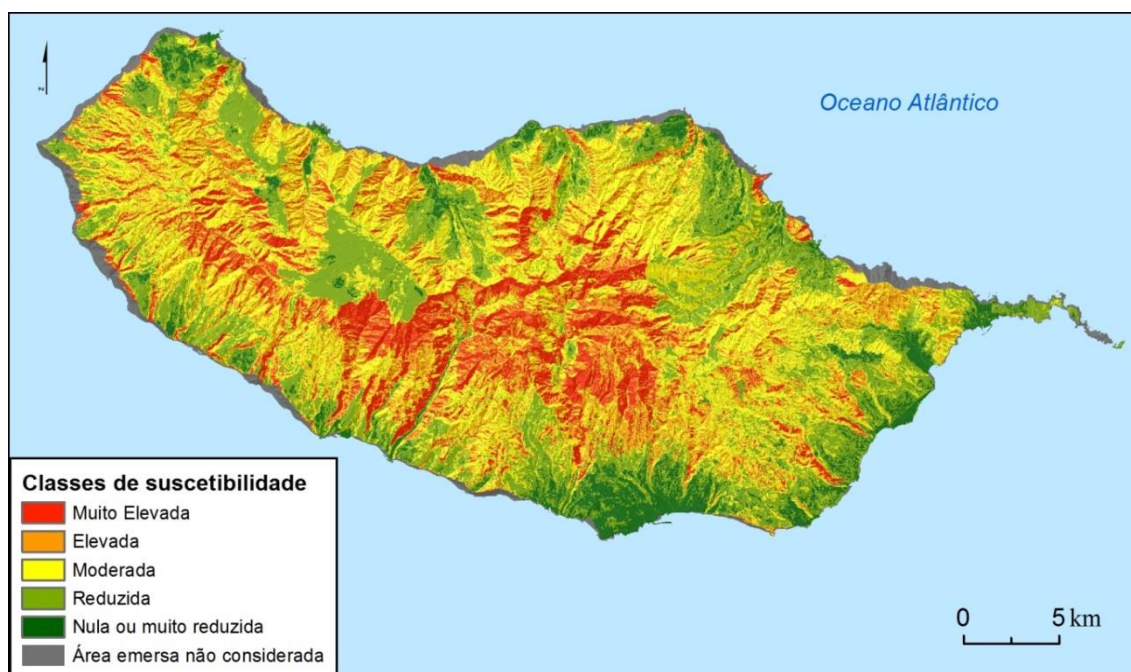


Figura 4-21 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos no interior da ilha, para áreas deslizadas superiores a 100 m<sup>2</sup>.

No caso do modelo corrido com o grupo de deslizamentos cujas áreas deslizadas são superiores a 500 m<sup>2</sup> (Figura 4-22), verifica-se que a classe de suscetibilidade muito

elevada representa 2,86 % do total da área de estudo, contendo 30,86 % do total da área deslizada. Ao relacionar-se a área da classe com a área deslizada, verifica-se que a probabilidade de se encontrar áreas deslizadas na classe de suscetibilidade muito elevada é de 0,23 %.

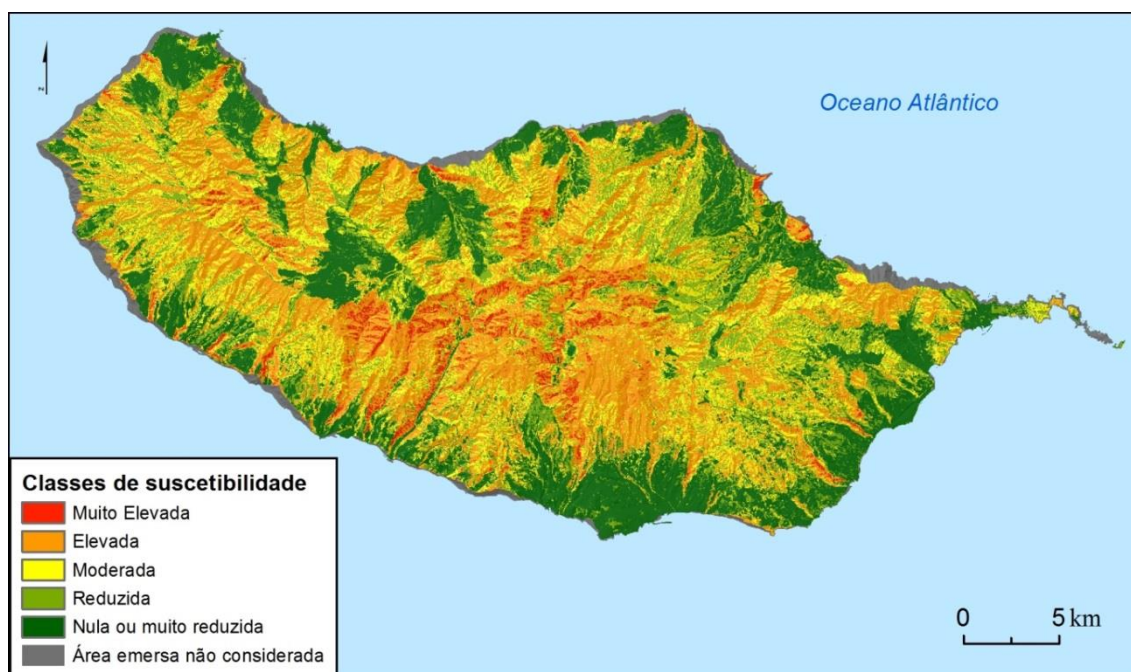


Figura 4-22 - Suscetibilidade a deslizamentos no interior da ilha, para áreas deslizadas superiores a 500 m<sup>2</sup>.

No caso do modelo corrido com o grupo de deslizamentos cujas áreas deslizadas são superiores a 1000 m<sup>2</sup> (Figura 4-23), verifica-se que a classe de suscetibilidade muito elevada representa 1,4 % do total da área de estudo, contendo 38,1 % do total da área deslizada. Ao relacionar-se a área da classe com a área deslizada, verifica-se que a probabilidade de se encontrar áreas deslizadas na classe de suscetibilidade muito elevada é de 0,36 %.

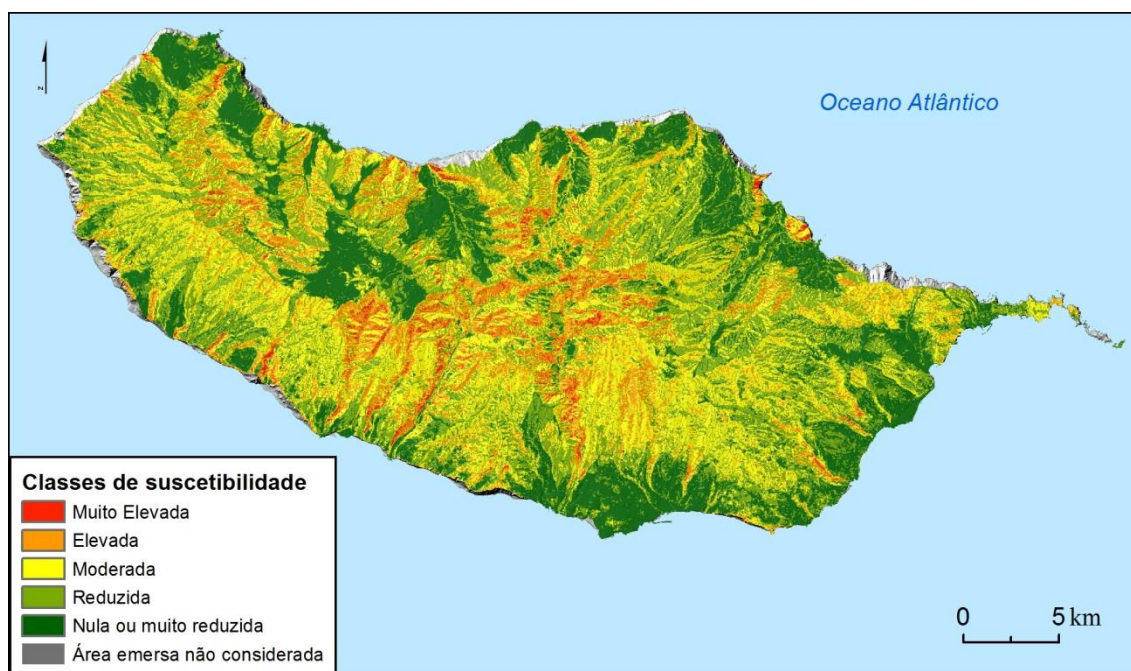


Figura 4-23 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos no interior da ilha, para áreas deslizadas superiores a 1000 m<sup>2</sup>.

Quadro 4.8 - Frequência relativa (%) da área da classe e área deslizada, face ao interior da ilha da Madeira, e a probabilidade condicionada de área deslizada por classe de suscetibilidade.

| Interior da ilha           |                                   |                    |             |                                   |                    |             |                                    |                    |             |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------|-----------------------------------|--------------------|-------------|------------------------------------|--------------------|-------------|
| Classes de suscetibilidade | Deslizamentos > 100m <sup>2</sup> |                    |             | Deslizamentos > 500m <sup>2</sup> |                    |             | Deslizamentos > 1000m <sup>2</sup> |                    |             |
|                            | Área da classe (%)                | Área deslizada (%) | Prob. cond. | Área da classe (%)                | Área deslizada (%) | Prob. cond. | Área da classe (%)                 | Área deslizada (%) | Prob. cond. |
| Nula ou muito reduzida     | 0,1                               | 0,0                | 0,000       | 23,34                             | 0,00               | 0,00        | 21,0                               | 0,0                | 0,000       |
| Reduzida                   | 28,3                              | 3,7                | 0,006       | 19,88                             | 5,73               | 0,01        | 34,8                               | 5,4                | 0,002       |
| Moderada                   | 37,0                              | 19,6               | 0,025       | 21,62                             | 10,12              | 0,01        | 30,0                               | 24,4               | 0,011       |
| Elevada                    | 19,9                              | 22,0               | 0,053       | 32,29                             | 53,29              | 0,04        | 12,9                               | 32,2               | 0,032       |
| Muito elevada              | 14,7                              | 54,7               | 0,178       | 2,86                              | 30,86              | 0,23        | 1,4                                | 38,1               | 0,355       |

#### c) O setor da faixa costeira

A Figura 4-24, mostra as quebras naturais das curvas de sucesso utilizadas na classificação dos mapas de suscetibilidade elaborados tendo em conta a faixa costeira da ilha da Madeira com os diferentes grupos de deslizamentos.

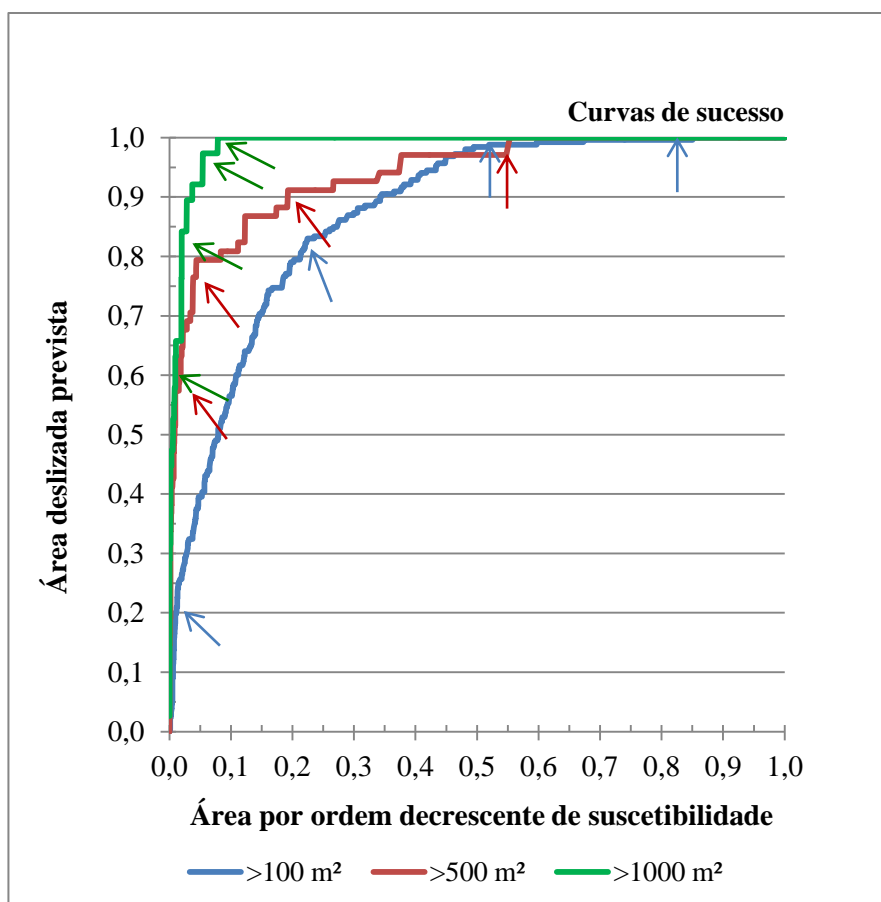


Figura 4-24 - Delimitação das classes de suscetibilidade a deslizamentos para a faixa costeira, tendo em conta as quebras naturais das curvas de sucesso.

O Quadro 4.9 indica o intervalo dos *scores* do VI dos mapas de suscetibilidade, bem como os limites das classes de suscetibilidade, tendo em conta os 3 grupos de deslizamentos e a faixa costeira.

Assim, as unidades de terreno onde a probabilidade de ocorrência de deslizamentos é menor são aquelas cujos valores de VI são -11,75, -5,90 e -5,32, para os modelos corridos com áreas deslizadas superiores a 100 m<sup>2</sup>; 500 m<sup>2</sup> e 1000 m<sup>2</sup>, respetivamente. As unidades de terreno com maior probabilidade de deslizar são aquelas cujos valores de VI são 6,53, 8,74 e 11,42, igualmente, tendo em conta as áreas deslizadas superiores a 100 m<sup>2</sup>; 500 m<sup>2</sup> e 1000 m<sup>2</sup>, respetivamente.



Quadro 4.9 - Valores de VI utilizados na delimitação das classes de suscetibilidade.

| Faixa costeira            |      |       |                          |      |       |                           |      |      |
|---------------------------|------|-------|--------------------------|------|-------|---------------------------|------|------|
| >100 m <sup>2</sup>       |      |       | >500 m <sup>2</sup>      |      |       | >1000 m <sup>2</sup>      |      |      |
| Intervalo [-11,75 - 6,53] |      |       | Intervalo [-5,90 - 8,74] |      |       | Intervalo [-5,32 - 11,42] |      |      |
| AEA                       | ADA  | VI    | AEA                      | ADA  | VI    | AEA                       | ADA  | VI   |
| 0,85                      | 1,00 | -5,68 | 0,55                     | 1,00 | -1,92 | 0,08                      | 1,00 | 1,15 |
| 0,51                      | 0,98 | -1,55 | 0,19                     | 0,91 | 0,11  | 0,06                      | 0,97 | 1,45 |
| 0,22                      | 0,82 | 0,67  | 0,04                     | 0,79 | 2,11  | 0,02                      | 0,84 | 2,86 |
| 0,02                      | 0,27 | 2,90  | 0,03                     | 0,67 | 2,68  | 0,01                      | 0,65 | 3,97 |
| 0,30                      | 0,87 | 0,00  | 0,20                     | 0,91 | 0,00  | 0,20                      | 1,00 | 0,00 |

Área de Estudo Acumulada (AEA); Área Deslizada Acumulada (ADA).

Na suscetibilidade a deslizamentos na faixa costeira decorrente do modelo corrido com todos os deslizamentos, a classe de suscetibilidade muito elevada representa 1,3 % do total da área de estudo e contém 21,7 % do total da área deslizada. Ao relacionar-se a área dessa classe com a área deslizada nessa mesma classe, verifica-se que a probabilidade de se encontrar áreas deslizadas é de 1,94 %.

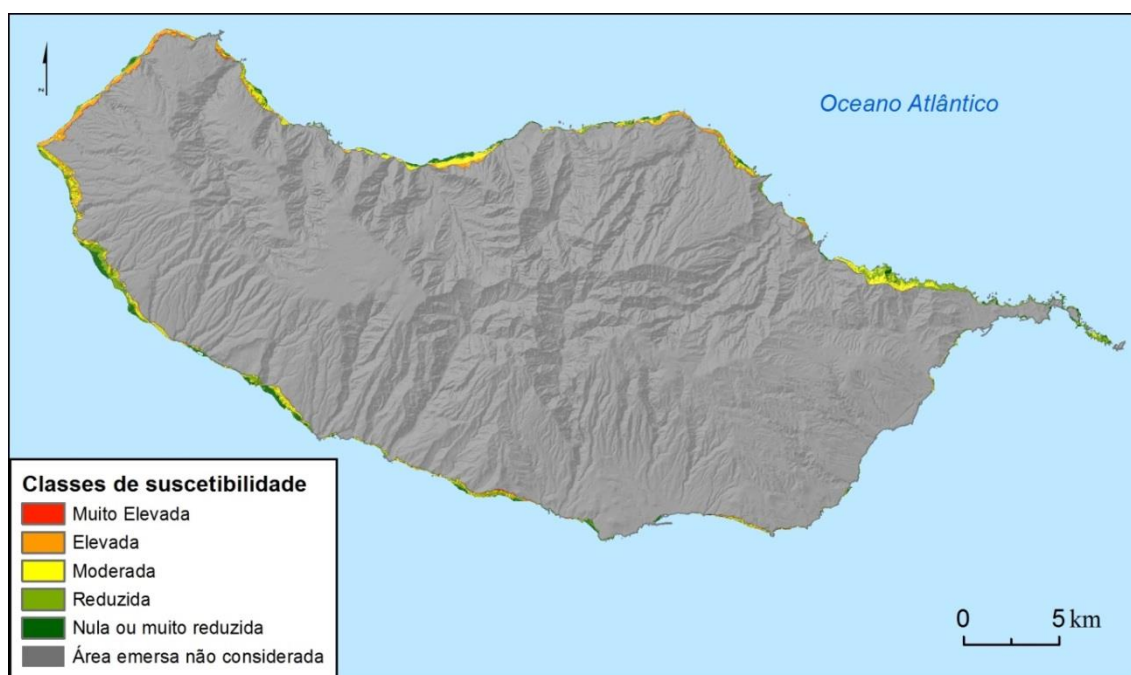


Figura 4-25 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na faixa costeira da ilha, para áreas deslizadas superiores a 100 m<sup>2</sup>.

No caso do modelo corrido com o grupo de deslizamentos cujas áreas deslizadas são superiores a 500 m<sup>2</sup>, verifica-se que a classe de suscetibilidade muito elevada representa 2,17 % do total da área de estudo contendo 72,2 % do total da área deslizada. Ao

relacionar-se a área da classe com a área deslizada, verifica-se que a probabilidade de se encontrar áreas deslizadas na classe de suscetibilidade muito elevada é de 1,08 %.

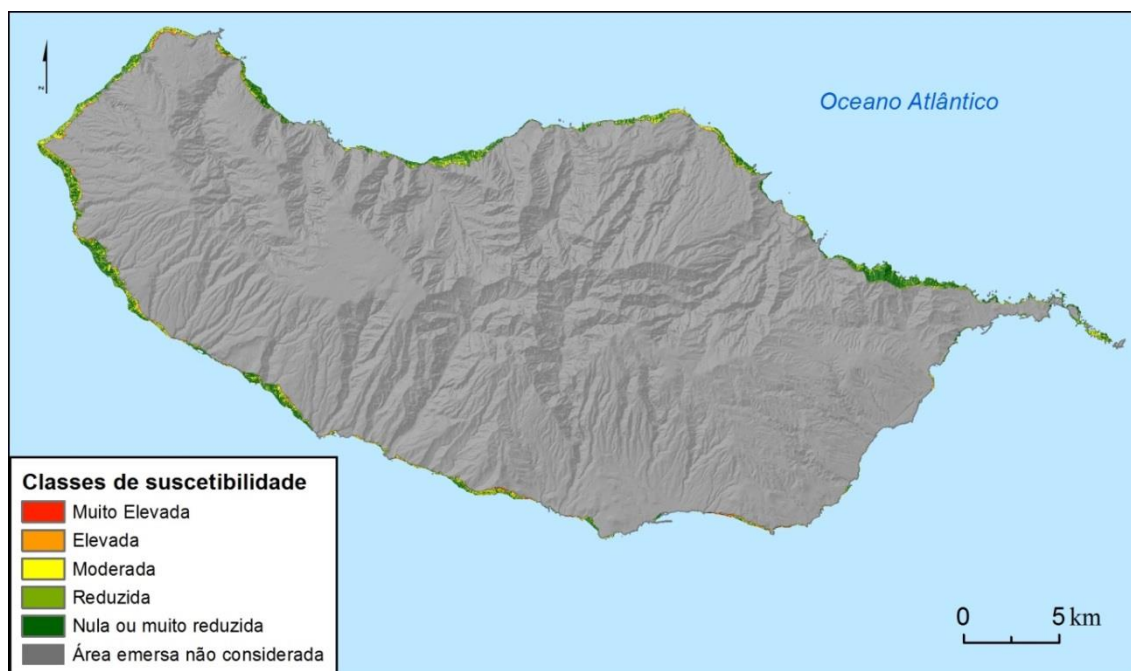


Figura 4-26 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na faixa costeira da ilha, para áreas deslizadas superiores a 500 m².

No caso do modelo corrido com o grupo de deslizamentos cujas áreas deslizadas são superiores a 1000 m², verifica-se que a classe de suscetibilidade muito elevada representa apenas 0,7 % do total da área de estudo, contudo, esta classe contem 60 % do total da área deslizada. Ao relacionar-se a área da classe com a área deslizada, verifica-se que a probabilidade de se encontrar áreas deslizadas na classe de suscetibilidade muito elevada é de 1,61 %.

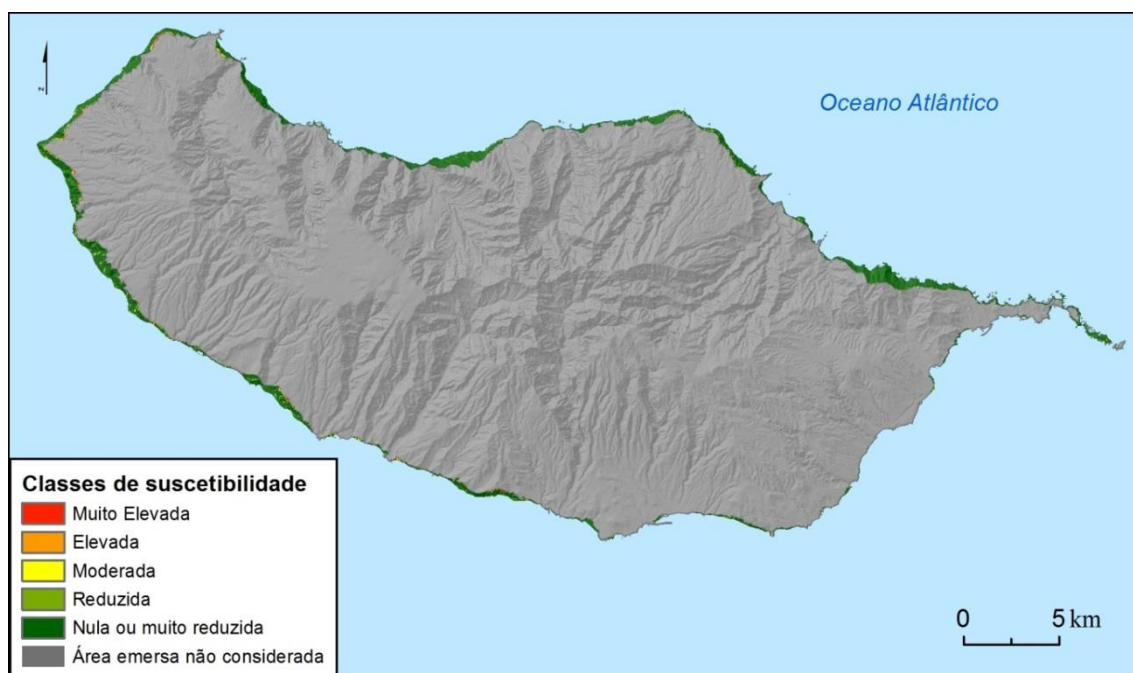


Figura 4-27 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na faixa costeira da ilha, para áreas deslizadas superiores a 1000 m².

Quadro 4.10 - Frequência relativa (%) da área da classe e área deslizada, face à totalidade da área da faixa costeira e deslizada, e a frequência relativa da área deslizada na classe de suscetibilidade.

| Classes de suscetibilidade | Faixa costeira        |                    |             |                       |                    |             |                        |                    |             |
|----------------------------|-----------------------|--------------------|-------------|-----------------------|--------------------|-------------|------------------------|--------------------|-------------|
|                            | Deslizamentos > 100m² |                    |             | Deslizamentos > 500m² |                    |             | Deslizamentos > 1000m² |                    |             |
|                            | Área da classe (%)    | Área deslizada (%) | Prob. Cond. | Área da classe (%)    | Área deslizada (%) | Prob. Cond. | Área da classe (%)     | Área deslizada (%) | Prob. Cond. |
| Nula ou muito reduzida     | 15,0                  | 0,0                | 0,000       | 44,63                 | 0,00               | 0,00        | 85,2                   | 0,0                | 0,000       |
| Reduzida                   | 33,8                  | 1,6                | 0,005       | 36,24                 | 13,89              | 0,01        | 8,9                    | 2,5                | 0,005       |
| Moderada                   | 29,4                  | 17,0               | 0,066       | 14,78                 | 5,56               | 0,01        | 3,8                    | 10,0               | 0,048       |
| Elevada                    | 20,6                  | 59,7               | 0,330       | 2,19                  | 8,33               | 0,12        | 1,5                    | 27,5               | 0,336       |
| Muito elevada              | 1,3                   | 21,7               | 1,937       | 2,17                  | 72,22              | 1,08        | 0,7                    | 60,0               | 1,612       |

Após a classificação dos mapas de suscetibilidade da faixa costeira e do interior da ilha, segundo as quebras naturais das respectivas curvas de sucesso, e por se verificar que os valores de AAC são melhores quando a análise é efetuada em separado, procedeu-se à junção das áreas adjacentes, de modo a obter-se um único mapa de suscetibilidade que corresponda à área total da ilha. A junção dos mapas foi realizada no ArcGIS 10.1 a com a ferramenta “*Mosaic To New Raster*” que permite a "colagem" dos mapas



mantendo os mesmos valores de célula. O resultado da “colagem” dos dois mapas fornece os melhores resultados para cada setor, e logo, um mapa final melhor, visto que, tal como se concluiu anteriormente, estes dois setores apresentam dinâmicas parcialmente diferentes.

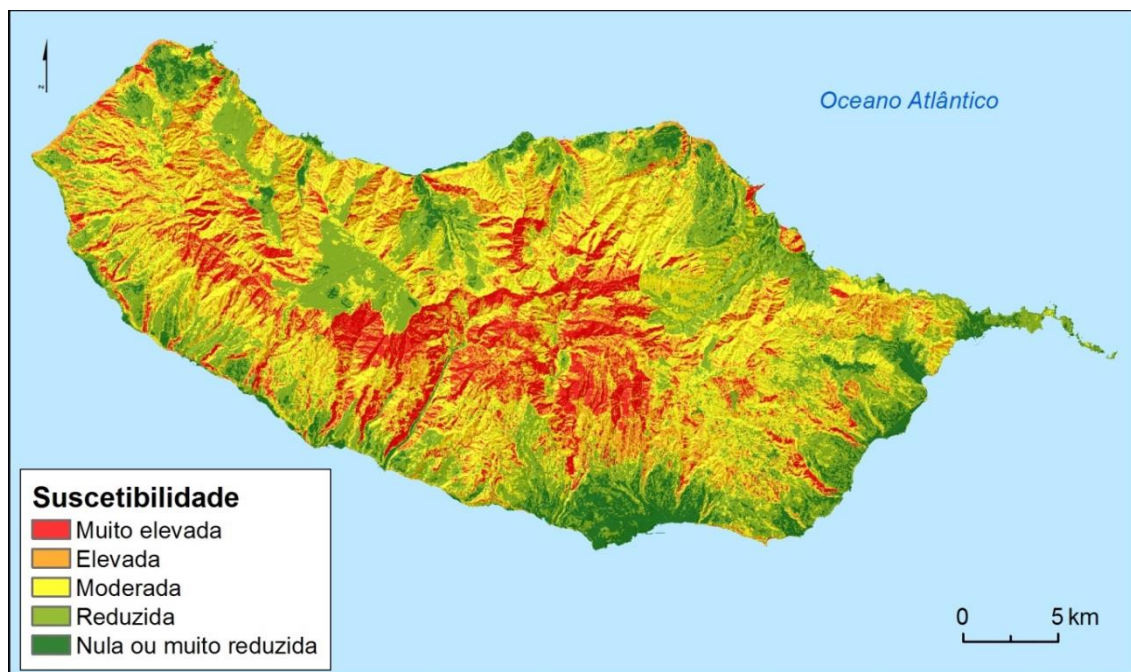


Figura 4-28 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na ilha da Madeira, para áreas deslizadas superiores a 100 m², resultante da união dos mapas de suscetibilidade do interior e da faixa costeira.

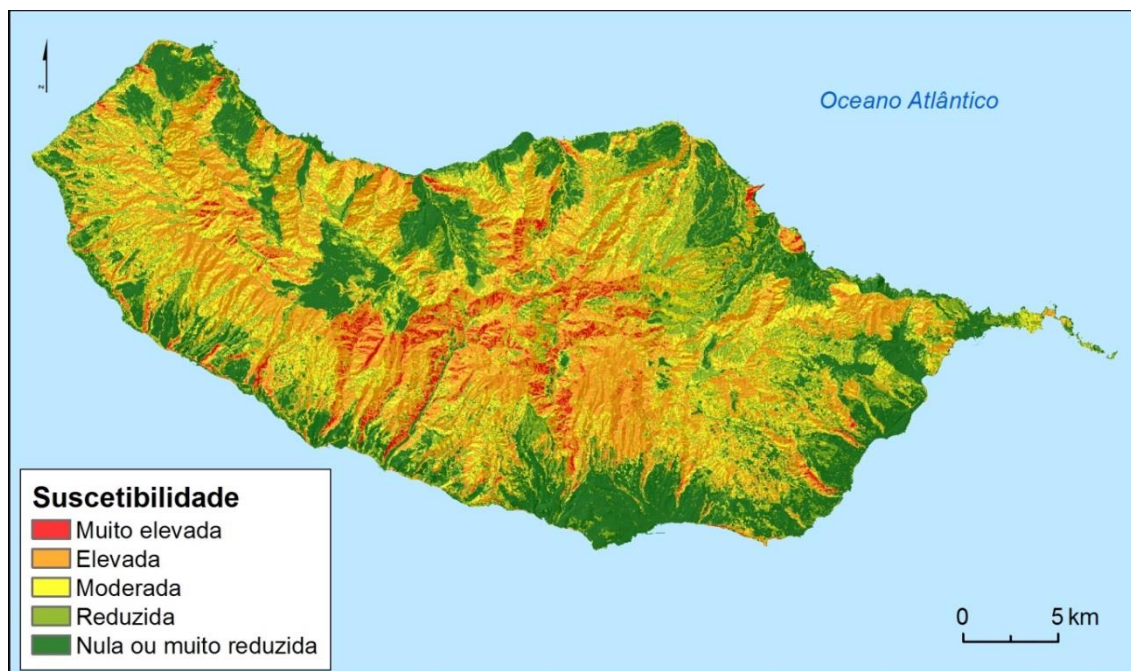


Figura 4-29 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na ilha da Madeira, para áreas deslizadas superiores a 500 m², resultante da união dos mapas de suscetibilidade do interior e da faixa costeira.

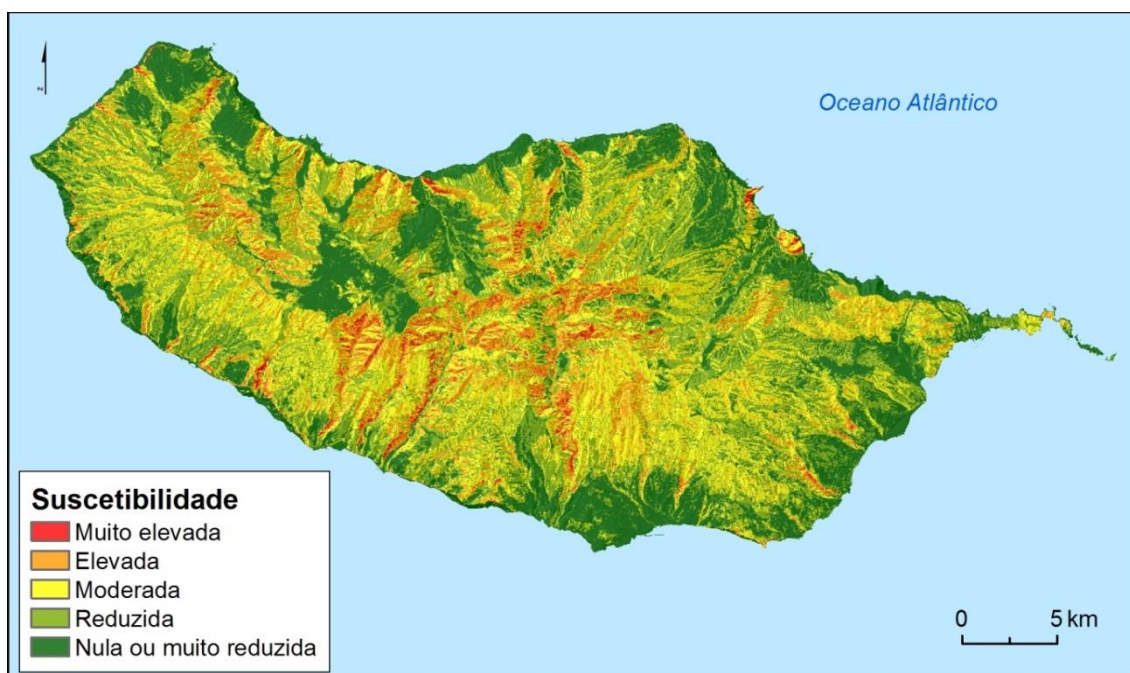


Figura 4-30 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na ilha da Madeira, para áreas deslizadas superiores a 1000 m<sup>2</sup>, resultante da união dos mapas de suscetibilidade do interior e da faixa costeira.

Quadro 4.11- Frequência relativa (%) da área da classe e área deslizada, face à totalidade da ilha da Madeira.

| Suscetibilidade        | Deslizamentos > 100 m <sup>2</sup> |          | Deslizamentos > 500 m <sup>2</sup> |          | Deslizamentos > 1000 m <sup>2</sup> |          |
|------------------------|------------------------------------|----------|------------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|
|                        | Área (ha)                          | Área (%) | Área (ha)                          | Área (%) | Área (ha)                           | Área (%) |
| Nula ou muito reduzida | 52,7                               | 7,1      | 177,4                              | 24,0     | 178,0                               | 24,1     |
| Reduzida               | 197,0                              | 26,6     | 150,7                              | 20,4     | 242,6                               | 32,8     |
| Moderada               | 254,0                              | 34,3     | 158,5                              | 21,4     | 216,3                               | 29,2     |
| Elevada                | 137,7                              | 18,6     | 232,2                              | 31,4     | 92,7                                | 12,5     |
| Muito elevada          | 98,4                               | 13,3     | 21,0                               | 2,8      | 10,2                                | 1,4      |

Após a obtenção dos mapas finais que melhores resultados de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos apresentaram para a ilha da Madeira, foi efetuado um cruzamento entre as classes de suscetibilidade "Muito elevada" e "Elevada" presentes em cada um dos mapas de diferentes magnitudes de deslizamentos. O objetivo desta operação visa perceber em que percentagem, estas áreas se sobrepõem, e em que classes se encontram as áreas não coincidentes.

Analisando os resultados do Quadro 4.12, verifica-se que a área classificada com suscetibilidade "Muito elevada" presente no mapa de suscetibilidade elaborado com

deslizamentos superiores a 500 m<sup>2</sup> é coincidente em 96,8 % com a área da classe respectiva, presente no mapa classificado com deslizamentos superiores a 100 m<sup>2</sup>. A área não coincidente encontra-se distribuída em 2,6 % pela classe imediatamente abaixo “Elevada” e 0,7 % pelas restantes classes. Tendo em conta os mesmos mapas, a classe de suscetibilidade “Elevada”, do mapa com deslizamentos > 500 m<sup>2</sup> é coincidente com o mapa com deslizamentos > 100 m<sup>2</sup>, em 49,9 % com a área da classe “Elevada”, 33,6 % com a área da classe “Muito elevada” e 16,3 % com a área da classe “moderada”.

A área classificada com suscetibilidade "Muito elevada" presente no mapa elaborado com deslizamentos superiores a 1000 m<sup>2</sup> é coincidente em 95,1 % com a área da classe respectiva presente no mapa classificado com deslizamentos superiores a 100 m<sup>2</sup>, e em 95,7% com a área da classe, presente no mapa classificado com deslizamentos superiores a 500 m<sup>2</sup>. A área não coincidente em relação ao mapa com deslizamentos > 100 m<sup>2</sup>, encontra-se distribuída em 4 % pela classe imediatamente abaixo “Elevada”, pela classe “Moderada” 0,8 e 0,1 % pelas restantes classes. Em relação ao mapa com deslizamentos > 500 m<sup>2</sup>, a área não coincidente distribui-se em 3,9 % na classe “Elevada” e 0,4 % pelas restantes classes.

No caso da área classificada com suscetibilidade "Elevada" presente no mapa com deslizamentos > 1000 m<sup>2</sup>, é coincidente em 31 % com a área da classe respectiva presente no mapa classificado com deslizamentos superiores a 100 m<sup>2</sup>, e em 88 % com a área da classe, presente no mapa classificado com deslizamentos superiores a 500 m<sup>2</sup>. A área não coincidente relação ao mapa com deslizamentos > 100 m<sup>2</sup>, encontra-se distribuída em 64,7% pela classe “Muito elevada”, 4,1 % pela classe imediatamente abaixo “Moderada” e 0,3% pelas restantes classes. Em relação ao mapa com deslizamentos > 500 m<sup>2</sup>, a área não coincidente distribui-se em 11,6 % na classe “Muito elevada”, 0,3 % na classe “Moderada” e 0,1 % pelas restantes classes.

Quadro 4.12 - Área coincidente (%) das classes de suscetibilidade muito elevada e elevada dos mapas elaborados com diferentes magnitudes de deslizamentos.

| Deslizamentos        |                 | >100 m <sup>2</sup> |         |          |                | >500 m <sup>2</sup> |         |          |                |
|----------------------|-----------------|---------------------|---------|----------|----------------|---------------------|---------|----------|----------------|
|                      | Suscetibilidade | Muito elevada       | Elevada | Moderada | Outras classes | Muito elevada       | Elevada | Moderada | Outras classes |
| >500 m <sup>2</sup>  | Muito elevada   | 96,8                | 2,6     | 0,6      | 0,1            | 100                 | -       | -        | -              |
|                      | Elevada         | 33,6                | 49,9    | 16,3     | 0,2            | -                   | 100     | -        | -              |
| >1000 m <sup>2</sup> | Muito elevada   | 95,1                | 4,0     | 0,8      | 0,1            | 95,7                | 3,9     | 0,2      | 0,2            |
|                      | Elevada         | 64,7                | 31,0    | 4,1      | 0,3            | 11,6                | 88,0    | 0,3      | 0,1            |

As áreas classificadas com suscetibilidade “Muito elevada” à ocorrência de deslizamentos de magnitude superior a 100 m<sup>2</sup> verificam-se um pouco por toda a ilha em declives acima dos 35°. Já as áreas com a mesma classificação, mas correspondentes a deslizamentos superiores a 500 m<sup>2</sup>, abrangem áreas menores que os anteriores (-78,6 %) e encontram-se sobretudo nas vertentes localizadas a maiores altitudes nomeadamente em torno do maciço central, estendendo-se pelas vertentes expostas a sul do Paul da Serra e da Serra de Urze. Verificam-se igualmente nas vertentes com exposição oeste da Ribeira da Madalena, da Ponta do Sol e da Ribeira Brava, continuando para montante na Ribeira da Serra de Água. Para essa mesma classe de suscetibilidade, mas com deslizamentos superiores a 1000 m<sup>2</sup>, a área é 98,7 % inferior à área dos primeiros e 51,7 % inferior à área dos deslizamentos superiores a 500 m<sup>2</sup>, e localizam-se nas mesmas áreas de suscetibilidade destes últimos.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em conta o principal objetivo do trabalho, foi avaliada e cartografada a suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente (deslizamentos) na ilha da Madeira, e procedeu-se à sua classificação.

Para que tal objetivo fosse alcançado, foram estabelecidos objetivos específicos aos quais foram igualmente dadas respostas.

A identificação dos deslizamentos existentes através da interpretação de ortofotos de grande resolução, juntamente com os deslizamentos inventariados por Almeida (2013), permitiu cartografar 1026 deslizamentos com magnitudes  $>100 \text{ m}^2$ , dos quais 138 com área deslizada  $>500 \text{ m}^2$  e 39 com área deslizada  $>1000 \text{ m}^2$ , que se revelaram suficientes para a realização do estudo a esta escala. Neste contexto, importa referir que alguns deslizamentos ficaram certamente por inventariar, por se localizarem em áreas de “sombra”, não sendo por isso detetáveis.

O cruzamento dos deslizamentos com os fatores condicionantes revelou que as vertentes com exposição a sudeste, com declives superiores a  $35^\circ$  e com um perfil topográfico côncavo são as que registam maior área deslizada. Os deslizamentos registam maior prevalência em áreas compostas por derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basaltos e basanitos), com intercalações de tufitos, depósitos piroclásticos de queda e ocasionais produtos máficos de atividade freato-magmática, em andossolos húmicos e em florestas abertas, vegetação arbustiva e herbácea e onde o índice topográfico de humidade nem é muito seco nem muito húmido, isto é nem nas vertentes muito declivosas onde a água não se detém nem em áreas planas onde a água se acumula.

A avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos realizada separadamente, para a área total da ilha, e para os dois setores, faixa costeira e interior, com cada tipo de magnitude de deslizamento, revelou-se bastante eficaz na previsão dos locais mais suscetíveis para a ocorrência de deslizamentos e permitiu concluir que uma análise feita por setor fornece melhores resultados do que uma análise efetuada para toda a área de estudo, sem ter em conta algumas especificidades de cada setor. Esta conclusão foi obtida através da análise dos resultados das taxas de sucesso e respetivas AAC que revelaram valores mais elevados, na faixa costeira e no interior do que na totalidade da ilha. Neste contexto, optou-se por se considerar que o mapa da suscetibilidade à

ocorrência de deslizamentos na ilha da Madeira seria o resultado da junção dos dois setores (faixa costeira e interior) e não o que foi analisado com a totalidade da área de estudo.

Outra conclusão a ter em conta é o facto dos valores das AAC serem mais elevados nos modelos corridos com deslizamentos de maiores dimensões. Para este facto concorrerá, certamente, a maior facilidade de identificação e de delimitação destes deslizamentos. A quantificação dos valores, máximos e mínimos, que matematicamente fossem possíveis obter, tendo em conta os respetivos deslizamentos, revelaram um intervalo de valores bastante alargado, muito próximos de 0 e de 1, não condicionando por isso os resultados obtidos.

Como seria de esperar, quando se utilizam deslizamentos de maiores dimensões, a área com suscetibilidade “Muito elevada” é mais restrita do que quando se utilizam deslizamentos mais pequenos, ou seja, esta última ocorre de forma mais generalizada na Ilha, enquanto quando se consideram deslizamentos sucessivamente maiores essas áreas de suscetibilidade “Muito elevada” ficam cada vez mais restritas. No entanto, ficou igualmente claro neste estudo que há uma grande coincidência quanto às áreas de maior suscetibilidade, para os 3 grupos de dimensões de deslizamentos, pelo que se concluiu que os fatores que influenciam os deslizamentos de maior dimensão influenciam também, de forma similar, a ocorrência de deslizamentos de menores dimensões. Todavia, o mesmo não se pode dizer em sentido contrário, a julgar pela abrangência espacial da classe de suscetibilidade “Muito elevada” para os 3 grupos, bastante diferenciada.

Os deslizamentos de vertente, à semelhança de muitos outros fenómenos da natureza não são de fácil previsão. Como ficou demonstrado neste trabalho, a avaliação e a cartografia da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos, pode e deve ser feita, dividindo e analisando separadamente, setores da área de estudo, que por qualquer circunstância possam apresentar dinâmicas diferentes.

Neste caso, utilizaram-se os setores da faixa costeira e do interior; contudo, os resultados obtidos abrem horizontes para formulação de novas questões, como por exemplo:

- Os deslizamentos ocorridos em ambiente de montanha são capazes de justificar os deslizamentos ocorridos a baixas altitudes, ou o contrário?
- Serão os deslizamentos ocorridos em vertentes expostas a norte, justificados pelos deslizamentos ocorridos nas vertentes com exposição a sul, particularmente tendo como base a oposição entre os dois grandes setores da Ilha?





## BIBLIOGRAFIA

- Abreu, U., Tavares, A. e Rodrigues, D. (2008) - Processos de perigosidade natural no município de Câmara de Lobos – Madeira. Contributo para a gestão do risco e da emergência. *Territorium*. 15, 53-71.
- Almeida, N. (2013) - Avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos em âmbito municipal: concelhos de Porto Moniz, Ribeira Brava, Santana e São Vicente (Ilha da Madeira). Relatório de estágio de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial Aplicados ao Ordenamento, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- ANPC (2009a) - Guia para a Caracterização de Risco no Âmbito da Elaboração de Planos de Emergência de Proteção Civil. Cadernos Técnicos, PROCIV, nº 9, Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), Carnaxide.
- ANPC (2009b) - Manual de Apoio à Elaboração e Operacionalização de Planos de Emergência de Proteção Civil. Cadernos Técnicos, PROCIV, nº 3. Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), Carnaxide.
- Ascenso, V. (2011) - Análise da ocorrência de cheias e deslizamentos de vertente no Concelho da Batalha. Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- Baeza, C., Lantada, N. e Maya, J. (2010) - Influence of sample and terrain unit on landslide susceptibility assessment at La Pobla de Lillet, Eastern Pyrenees, Spain. *Environ Earth Sci* (2010) 60:155–167. DOI 10.1007/s12665-009-0176-4.
- Baioni, D. (2011) - Human activity and damaging landslides and floods on Madeira Island. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(11), 3035–3046. doi: 10.5194/nhess-11-3035-2011.
- Bateira, C. (2001) - Movimentos de Vertente no NW de Portugal, Susceptibilidade Geomorfológica e Sistemas de Informação Geográfica. Dissertação de doutoramento em Geografia Física, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto.
- Böhner, J. e Selige, T. (2006) - Spatial Prediction of Soil Attributes Using Terrain Analysis and Climate Regionalisation. In: *SAGA - Analyses and Modelling Applications*. Böhner, J., McCloy, K.R., Strobl, J. [Eds.]: Göttinger Geogr. Abh.
- Carvalho, A. M. Galopim de, e Brandão, J. M. (1991) - Geologia do Arquipélago da Madeira. Publicação do Museu Nacional de História Natural, 170 pp.
- Castro, J. (2011) - Caracterização hidráulica, hidrológica e de transporte sólido do evento de 20 de Fevereiro de 2010 na Ribeira de João Gomes - Ilha da Madeira.

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade da Madeira.

- Chung, C.J. F., e Fabbri, A. (1999) - Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrametric Engineering & Remote Sensing*, 65, No. 12, 1389-1399.
- Chung, C. e Fabbri, A. (2003) - Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Natural Hazards*, 30(3), 451–472. doi: 10.1023/B:NHAZ.00000007172.62651.2b
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C. e Vescovi, P. (2006) - A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the Conditional Analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines) *Environ Geol* 50: 941–96. doi: 10.1007/s00254-006-0264-7
- Fernandes, M. (2009) - Riscos no Concelho da Ribeira Brava Movimentos de Vertente Cheias Rápidas e Inundações. Dissertação de Mestrado em Dinâmicas Naturais e Riscos Naturais. Área de Especialização em Riscos Geomorfológicos e Hidrológicos, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra.
- Fragoso, M., Trigo, R., Pinto, J., Lopes, S., Lopes, A., Ulbrich, S. e Magro, C. (2012) - The 20 February 2010 Madeira flash-floods: synoptic analysis and extreme rainfall assessment. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(3), 715–730. doi: 10.5194/nhess-12-715-2012
- Frattoni, P., Crosta, G. e Carrara A. (2010) - Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology*. 111: 62 – 72.
- Garcia, R. (2002) - Avaliação do risco de movimentos de vertente na depressão da Abadia. Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ambiente, Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa.
- Garcia, R. (2012) - Metodologias de Avaliação da Perigosidade e Risco associado a Movimentos de Vertente Aplicação na bacia do rio Alenquer. Tese de Doutoramento em Geografia Física, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- Garcia, R., Zêzere, J. e Oliveira, S. (2007) - A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de suscetibilidade a movimentos de vertente. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, Volume V, APGeom, Lisboa, 265–279.
- Guillard, C. e Zêzere, J. (2010) - Avaliação e validação da suscetibilidade a deslizamentos no âmbito do planeamento municipal. Caso do estudo do Concelho de Loures. *Actas / Proceedings do V Congresso Nacional de Geomorfologia*, Porto.

- Guzzetti, F. (2005) - Landslide hazard and risk assessment. Dissertation zur erlangung des doktorgrads (Dr. Rer. Nat.) der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Italy.
- Julião, R., Nery, F., Ribeiro, J., Branco, M. e Zêzere, J. (2009) - Guia Metodológico para a Produção de Cartografia Municipal de Risco e para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de Base Municipal. Autoridade Nacional de Protecção Civil, Direcção-Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano.
- Lan, H., Zhou C., Wang, L, Zhang, H., e Li, R., (2004) - Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Eng Geol* 76:109–128
- Lopes, A., Lopes, S., Matzarakis, A. e Alcoforado, A. (2011) - The influence of the summer sea breeze on thermal comfort in Funchal (Madeira). A contribution to tourism and urban planning. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 20, No. 5, 553-564.
- Meneses, B. (2011) - Susceptibilidade e Risco de Movimentos de Vertente no Concelho de Tarouca. Dissertação de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial Aplicados ao Ordenamento, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- Nguyen, H., Wiatr, T., Fernández-Steege, T., Reicherter, K., Rodrigues, D., e Azzam, R. (2012) - Landslide hazard and cascading effects following the extreme rainfall event on Madeira Island (February 2010). *Natural Hazards*, 65(1), 635–652. doi:10.1007/s11069-012-0387-y
- Nguyen, H., Fernandez-Steege, T., Wiatr, T., Rodrigues, D. e Azzam, R. (2011) - Use of terrestrial laser scanning for engineering geological applications on volcanic rock slopes an example from Madeira Island (Portugal). *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11:807–817
- Oliveira, S. (2012) - Incidência Espacial e Temporal da Instabilidade Geomorfológica na Bacia do Rio Grande da Pipa (Arruda dos Vinhos). Tese de Doutoramento em Geografia Física, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- Oliveira, S., Rocha, J., Zêzere, J., Garcia, R. e Piedade, A. (2009) - Avaliação da Susceptibilidade a Deslizamentos Rotacionais Através da Aplicação de Métodos Estatísticos. *Cartografia e geodesia 2009. Actas da VI Conferencia Nacional de Cartografia e Geodesia*. LIDEL, Lisboa: 530-539.
- Pereira, S. (2009) - Perigosidade a Movimentos de Vertente na Região Norte de Portugal. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física, Faculdade de Letras, Universidade do Porto.

- Pereira, S., Zêzere, J. L., e Bateira, C. (2012) - Technical Note: Assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslide susceptibility models. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(4), 979–988. doi:10.5194/nhess-12-979-2012
- Policarpo, N. (2012) - Suscetibilidade aos movimentos de vertente e vulnerabilidade no concelho do Funchal. Relatório de estágio de Mestrado em Geografia e Ordenamento do Território, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- RAM., SRE. & DRA. (1992) - Carta dos Solos da Ilha da Madeira. Centro de Estudos de pedologia, Instituto Superior de Agronomia, Centro de Pedologia da Universidade Técnica de Lisboa, Direção Regional de Agricultura da Madeira. Lisboa
- Reis, E., Zêzere, J., Vieira, G., e Rodrigues, M. (2003) - Integração de dados espaciais em SIG para a avaliação de susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos. *Finisterra*, XXXVIII, 17, 3 – 34.
- Remondo, J., González, A., Dias de Terán, J. R., Cendrero, A., Fabbri, A., e Chung, C. J. (2003) - Validation of landslide susceptibility maps: examples and applications from a case study in northern Spain. *Natural Hazards*, 30, 437-449
- Ribeiro, M. e Ramalho, M. (2007) - Uma visita geológica ao Arquipélago da Madeira - Principais locais geo-turísticos. DRCIERAM / INETI.
- Rodrigues, D., Tavares, A., e Abreu, U. (2010) - Movimentos de vertente na ilha da Madeira. Eventos de Dezembro 2009 e de Fevereiro de 2010. VIII Congresso Nacional de Geologia, GEOTIC – Sociedade Geológica de Portugal, Revista Electrónica de Ciências da Terra, 9(7), 7–10.
- Santos, F. D. e Aguiar, R. (eds) (2006) - Impactos e Medidas de Adaptação às Alterações Climáticas no Arquipélago da Madeira - Projecto CLIMAAT II. Direcção Regional do Ambiente da Madeira, Funchal.
- Silva, J., Almeida, F. e Gomes, C. (2010) - Enxurradas e Inundações na Madeira. DNOTÍCIAS.pt - Serviço de documentação e impressão. Consultado em: <http://geomuseu.ist.utl.pt/MINGEO2010/Documentacao%20Complementar/Madeira%20DN.pdf>
- Silveira, A., Madeira, J., Ramalho, R., Fonseca, P., e Prada, S. (2010) - Notícia explicativa da Carta Geológica da Ilha da Madeira na escala 1:50.000, Folhas A e B. Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais - RAM e Universidade da Madeira, ISBN: 978-972-98405-2-4.
- Soeters, R., e Van Westen, C. J. (1996) - Slope instability recognition, analysis and zonation. In A. K. Turner, & R. L. Schuster, *Landslides: Investigation and*

- Mitigation, Special Report 247 (pp. 129-177). Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press.
- Sørensen, R., Zinko, U. e Seibert, J. (2006) - On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 101–112, 2006.
- SRARN (2003) - Plano Regional da Água da Madeira (PRAM). Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais. Funchal.
- Teixeira, M. (2005) - Movimentos de Vertente. Factores de Ocorrência e Metodologia de Inventariação. *Associação Portuguesa de Geólogos, Geonovas* n. 19, pp. 95 a 106
- Varnes, D. (1978) - Slope movement types and processes. in Schuster, R.L. e Krizek, R.J. (eds.) *Landslides - Analysis and control*. National Research Council, Washington, D.C., Transportation Research Board, Special Report 176, p. 11–33.
- Working Party on World Landslide Inventory, UNESCO (1993) - Multilingual landslide glossary. International Geotechnical Societies, Canadian Geotechnical Society. Richmond. Disponível em: <http://www.cgs.ca/pdf/heritage/Landslide%20Glossary.pdf>
- Yin, K. e Yan, T. (1988) - Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rock. In Bonnard C (ed.) *Landslides. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, 2, Balkema, Rotterdam: 1269 -1272.
- Zêzere, J. (2000) - A classificação dos Movimentos de Vertente: Tipologia, atividade e morfologia. *Apontamentos de Geografia - Série de Investigação: No 6*. Centro de Estudos Geográficos. Lisboa, 29 p.
- Zêzere, J. (2001) - Dinâmica de vertente e perigosidade geomorfológica na área metropolitana de Lisboa. II Seminário sobre Geologia Ambiental: Desprendimentos de terra e estabilidade de vertentes, Departamento de Ciências da Terra, Universidade do Minho, p. 29-40.
- Zêzere, J. (2005) - Dinâmica de vertentes e riscos geomorfológicos - Programa. Centro de Estudos Geográficos, Área de Geografia Física e Ambiente, Relatório no 41. Lisboa, 128 p.
- Zêzere, J.L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Rodrigues, M., Vieira, G. e Ferreira, A. (2004) - Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 4, European Geosciences Union, 133–146.